

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu
Energia- ja LVI-tekniikan koulutusohjelma

Turgay Aydin

**Maaperän uusiutuvan energian käytön tutkiminen ilmanvaihdon
esilämmitykseen ja esijäähdytykseen toimistorakennuksissa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten

Espoo 7. Tammikuuta 2014

Valvoja: Professori Kai Sirén
Ohjaaja: Paavo Tikkanen, DI

AALTO-YLIOPISTO INSINÖÖRITIEIDEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 AALTO http://www.aalto.fi	DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ
Tekijä: Turgay Aydin	
Työn nimi: Maaperän uusiutuvan energian käytön tutkiminen ilmanvaihdon esilämmitykseen ja esijäähdytykseen toimistorakennuksissa	
Laitos: Koneenrakennustekniikan laitos Professuuri: Ene-58 LVI-tekniikka	
Valvoja: Professori Kai Sirén Ohjaaja: Diplomi-insinööri Paavo Tikkanen	
<p>Diplomityössä on tarkoitus esitellä lämmöntasaajan energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Työn tavoitteena on tutkia lämmöntasaajan soveltuvuutta toimistorakennuksiin Suomen olosuhteissa. Tässä työssä suunnitellaan lämmöntasaajajärjestelmä esimerkkirakennukseen ja tehdään tapaustutkimuksia, joissa vertaillaan keskenään rakenteellisten ja geologisten tekijöiden vaikutusta lämmöntasaajajärjestelmän toimintaan. Esimerkkirakennuksena käytetään Aalto Yliopiston toimistorakennuksista Metallimiehenkuja 10:tä, joka oli yksi Granlund Oy:n suunnittelukohteista.</p> <p>Tässä diplomityössä esitetään myös ulkomailla toteutettuja esimerkkikohteita. Työn tärkeimpänä tavoitteena on luoda dynaaminen laskentatyökalu, jolla pystytään laskemaan ilmanvaihtojärjestelmän ulkoilman lämpötila annetulla järjestelmäkoolla ja myös lämmöntasaajajärjestelmällä käytettyjä ja säästettyjä energiamääriä tunneittain.</p> <p>Työssä selvisi, että rakenteelliset ratkaisut vaikuttavat järjestelmän toimintaan merkittävästi. Lisäksi pohjaveden pinnan tasolla on suuri vaikutus järjestelmän tehokkuuteen. Tutkimustuloksista todettiin, että lämmöntasaajajärjestelmä on paljolti riippuvainen maaperän ja ulkoilman vuorovaikutuksesta. Työssä tuli esille, että järjestelmä vaatii kehittynyttä valvontaa, vaikka sen ajatellaan olevan yksinkertainen.</p> <p>Työtä voidaan käyttää apuvälineenä lämmöntasaajajärjestelmän suunnittelussa sekä korjaus-, että uudiskohteissa.</p>	
Päivämäärä: 7.1.2014	Sivumäärä: 85 + liitteet

AALTO-YLIOPISTO INSINÖÖRITIEIDEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 AALTO http://www.aalto.fi	ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS
Author: Turgay Aydin	
Title of the thesis: Studying the use of soil's renewable energy in ventilation pre-heating and pre-cooling of office buildings.	
Department: Department of Engineering Design and Production Professorship: Ene-58 Heating, Ventilating and Air Conditioning Technology	
Supervisor: Professor Kai Sirén Instructor: Paavo Tikkanen, M.Sc. (Tech.)	
<p>The purpose of this thesis is to present the factors affecting energy performance of ground-air heat exchange system. The aim is to study suitability of the ground-air exchange system for office buildings in Finnish climate conditions. In the thesis, ground-air heat exchanger is designed for a sample building and case studies are done to compare impacts of structural and geological factors on functioning of ground-air heat exchange system. Aalto university's office building Metallimiehenkuja 10, which was one of the Granlund Oy's design objects, is used as an exemplary design.</p> <p>In this thesis are also presented sample sites carried out in abroad. The major goal of this thesis is to create a dynamic calculation tool, which is able to calculate the outdoor air temperature for ventilation system on the given size of the ground-air heat exchanger system, including amounts of used and saved energy on an hourly basis.</p> <p>It was found out that the structural solutions affect the system performance significantly; in addition the ground water level has a large impact on the efficiency of system. As a research result, it was found that the ground-air heat exchange system is largely dependent on the interaction between soil and outside air. The thesis showed that the system requires a sophisticated control, even though it is thought to be simple.</p> <p>The work can be used as a design tool for ground-air heat exchange systems in both new and repaired buildings.</p>	
Date: 7.1.2014	Number of pages: 85 + app.

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Granlund Oy:lle. Työn valvojana toimi professori Kai Sirén LVI-tekniikan laboratoriosta. Työn ohjaajana toimi diplomi-insinööri Paavo Tikkanen Granlund Oy:stä.

Haluan kiittää professori Kai Siréniä työhön liittyvistä neuvoista ja kommenteista, sekä erityisesti Paavo Tikkasta ohjauksesta ja kommentoinnista työn aikana. Lisäksi esitän kiitokset myös Tom L. Sundmanille, ins. Jesse Lintumäelle, sekä Frank Jäderholmille avusta työn eri vaiheissa.

Espoossa, 7.17.2014

Turgay Aydin

Sisällysluettelo

Käytetyt symbolit.....	
1. JOHDANTO	1
1.1. Tutkimuksen tausta.....	1
1.2. Tutkimuksen tavoitteet	5
1.3. Työn rakenne ja rajaus.....	5
1.4. Tutkimusmenetelmä	5
2. Ilmanvaihtojärjestelmät suurkohteissa.....	6
2.1. Ilmanvaihdon esilämmitys ja -jäähdytys lämmöntasaajalla	6
2.1.1. Yleistä järjestelmästä.....	6
2.1.2. Ulkoilman sisäänottotoiminto	8
2.1.3. Kondenssiveden poisto	9
2.1.4. Järjestelmän hygieniä.....	10
2.1.5. Järjestelmän lämmönsiirto-ominaisuudet	11
2.1.6. Järjestelmän tiiveys	12
2.1.7. Lämmöntasaajajärjestelmän asennus	13
2.1.8. Järjestelmän kanavien puhdistus.....	15
2.2. Kirjallisuuskatsaus.....	15
2.3. Rakennettuja esimerkkikohteita	26
3. Energianlaskentaympäristöjen kuvaus.....	33
3.1. RIUSKA	33
3.2. Dynaaminen laskentatyökalu.....	34
3.2.1. Laskentatyökalun toimintaperiaate	35
3.2.2. Laskentaan vaikuttavat tekijät.....	39
3.2.2.1. Ilmavirran vaikutus	40
3.2.2.2. Putkimateriaalin mekaanisten ja termisten ominaisuuksien vaikutus	46
3.2.2.3. Maalajin ominaisuuksien vaikutus	46
3.2.2.4. Lämmönsiirtoputken pituuden vaikutus	51
3.2.2.5. Tuulen nopeuden ja suunnan vaikutus.....	51
3.2.2.6. Maanpinnan ja ulkoilman välisen energiataseen vaikutus.....	54
3.2.2.7. Lumipeitteen vaikutus	60
3.2.2.8. Ympäröivän alueen maanpintatyypin vaikutus	62
3.2.2.9. Asennussyvyyden vaikutus.....	63
3.2.2.10. Pohjaveden vaikutus	64
3.2.2.11. Järjestelmän automatiikan vaikutus.....	66
4. Tapaustutkimukset.....	67
4.1. Asennussyvyyden vaikutus eri putkipituuksilla	69

4.2. Putkikoon vaikutus eri putkipituuksilla.....	70
4.3. Pohjaveden vaikutus eri putkipituuksilla.....	71
5. Tutkimustulosten tarkastelu.....	72
6. Johtopäätökset.....	79
Lähteet	81
Liitteet.....	

Käytetyt symbolit

COP ,	Järjestelmän lämpökerroin
\dot{Q}_L ,	Järjestelmän tuottama lämpöteho, kW
W_P ,	Puhaltimen teho, kW
$T(z,t)$	Lämpötila ajanhetkellä ja syvyydellä, °C
A_p	Maanpinnan lämpötilavaihtelun amplitudi, °C
z	Syvyys, m
t	Ajanhetki, s
d	Maanpinnan lämpötilavaihtelun tunkeutumis­syvyys, m
ω	Maanpinnan lämpötilavaihtelu kulmataajuudella, rad/s
T_0	Maanpinnan lämpötilavaihtelun keskiarvo, °C
s	Maalajin terminen diffusiviteetti, m ² /s
k	Lämmönjohtavuus, W/mK
ρ	Tiheys, kg/m ³
c	Ominais­lämpö­kapasiteetti, J/kgK
T_A	Ulkoilman vuosittainen keskilämpötila, °C
R	Lämpövastus, K/W
Δx	Kahden solmupisteen välinen etäisyys, m
A	Pinta-ala, m ²
α_p	Ilmavirran konvektiokerroin putkessa, W/m ² K
H	Lämpökonduktanssi, W/K
C	Lämpö­kapasiteetti, J/K
Δt	Kahden ajanhetken välinen aika-askel, s
U	Ilman virtausnopeus, m/s
V'	Tilavuusvirta ajanhetkellä, m ³ /s
A_D	Putken virtaussuuntainen pinta-ala, m ²
n	Lämmönsiirto­putkien määrä
Re	Reynoldsin luku
D	Lämmönsiirto­putken sisähalkaisija, m
ν	Ilman kinemaattinen viskositeetti, m ² /s
Nu	Nusseltin luku
λ	Kitkakerroin

k_a	Putken karheus, m
Pr	Prandtlin luku
ΔP_k	Kitkavastusten aiheuttama painehäviö, Pa
L	Putken pituus, m
ΔP_p	Paikallisvastusten aiheuttama painehäviö, Pa
ζ	Kertavastuskertoimien summa
ΔP	Kokonaispainehäviö, Pa
Q_P	Puhallinenergian lisäys, J
P_{tunt}	Ilman putken sisäpinnalle luovuttama konvektio, W
T_{ilma}	Ilman lämpötila putkipalassa, °C
T_{tub}	Putkipalan sisäpinnan lämpötila, °C
S_{tub}	Putkipalan sisäpinta-ala, m ²
m'_{ilma}	Ilman konvektiivinen massavirta, kg/s
m'_{lat}	Siirtyneen kosteuden massavirta, kg/s
x_{ilma}	Ilman absoluuttinen kosteus, kg/kg
x_{tub}	Kyllästyneen pinnallisen kosteuden absoluuttinen kosteus, kg/kg
RH	Ilman suhteellinen kosteus
$P_{kyl}(T_{ilma})$	Ilman kylläisen höyrynpaine, Pa
$P_{kyl}(T_{tub})$	Kyllästyneen pinnallisen kerroksen kylläisen höyrynpaine, Pa
M_{vesi}	Veden moolimassa, kg/mol
M_{ilma}	Ilman moolimassa, kg/mol
P_{ilma}	Ilman kokonaispaine, Pa
P_{lat}	Latenttilämpöteho, W
c_{lat}	Veden ominaishöyrystymislämpö, J/kg
m'_p	Yhdessä putkessa virtaavan ilman massavirta, kg/s
h	Ilman entalpia, kJ/kg
c_{pi}	Kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg°C
$l_{h,0}$	Veden höyrystymislämpö lämpötilassa 0°C, kJ/kg
c_{ph}	Vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg°C
$Q_{jääh/läm}$	Järjestelmän jäähdytys- tai lämmitysenergia, J
Δh	Ilman alkuvaiheen ja loppuvaiheen välinen entalpiaero, kJ/kg
m'	Ilman kokonaismassavirta, kg/s
q_{geo}	Lämpövuoto, W/m ²

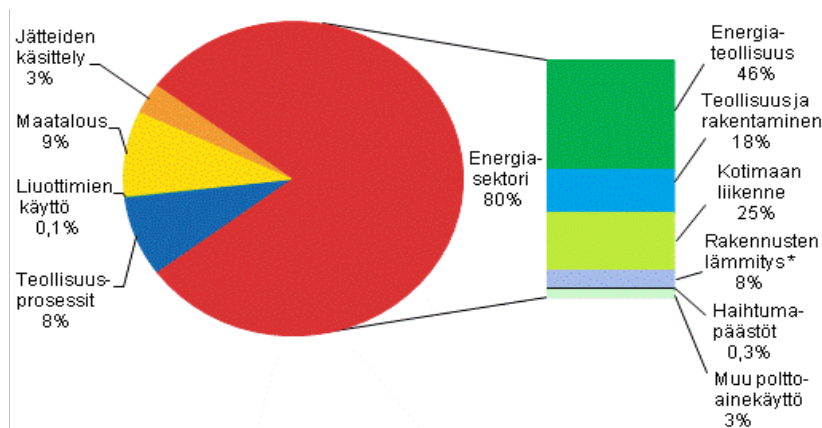
$\frac{\delta T}{\delta h}$	Lämpötilagradientti, K/m
rW	Rakennettavan alueen leveys, m
W	Rakennettavan alueen pituus, m
L_{kesk}	Keskimääräinen virtauspituus, m
$l_{ja\ t}$	Vakiot keskimääräisen pituuden laskeminen
A	Suorakulmion (rakennetun alueen) pinta-ala, m ²
P	Suorakulmion (rakennetun alueen) ympärysmitta, m
x_c	Kriittinen etäisyys, m
w	Tuulen nopeus, m/s
$x_{c,kesk}$	Keskimääräinen kriittinen etäisyys, m
r	Suorakulmion mittojen suhde
Re_{kesk}	Keskimääräinen Reynoldsin luku
R_f	Maanpinnan karheuskerroin
Ra	Rayleigh luku
g	Putoamiskiihtyvyys, m/s ²
T_s	Maanpinnan lämpötila, K
T_a	Ulkoilman lämpötila, K
L_c	Karakteristinen pituus, m
β	Lämpölaajenemiskerroin, 1/K
α_i	Virtaavan ulkoilman konvektiokerroin, W/m ² K
I_R	Heijastunut lyhytaaltainen säteily, W/m ²
I_T	Kokonaissäteily, W/m ²
φ	Maanpinnan albedo
q_s	Pitkäaaltoinen nettosäteily, W/m ²
I_V	Ilmakehän vastasäteily, W/m ²
I_U	Maanpinnan pitkäaaltoinen ulossäteily, W/m ²
ε	Maanpinnan emissivisyys
σ	Steffanin-Boltzmannin vakio, W/m ² K ⁴
P_h	Vesihöyryn osapaine, mbar
LE	Latentti lämpövirta, W/m ²
P_p^s	Maanpinnan kosteudessa kyllästyneen vesihöyryn osapaine, Pa
P_a	Ulkoilman vesihöyryn osapaine, Pa
f	Maan pintatyypistä sekä kosteustasosta riippuvainen vakio

1. JOHDANTO

1.1. Tutkimuksen tausta

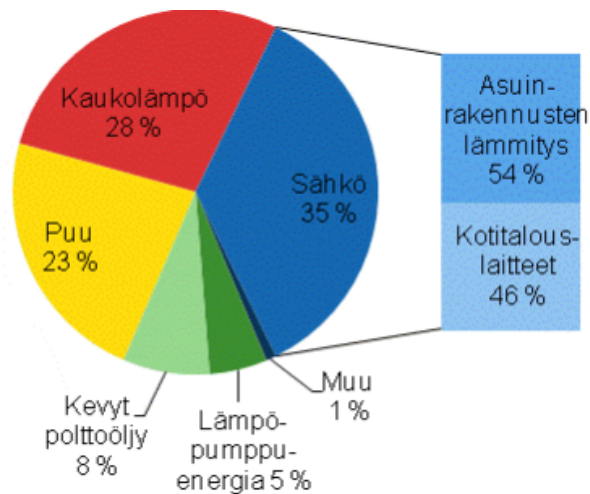
Ilmastomuutos on maailmanlaajuinen huolen aihe. Maailman energiankulutus on kaksinkertaistunut viimeisen 40 vuoden aikana väkimäärän kasvaessa jatkuvasti ja nostanut päästöjä. Tästä syystä vuoteen 2050 mennessä hiilidioksidipäästöjä on vähennettävä 50 % nykyisestä, jos ilmaston lämpeneminen halutaan rajoittaa asetetun tavoitteen mukaisesti +2 asteeseen celsiusta. Tämä on erittäin haastava tehtävä maapallon kasvavan väkimäärän ja kulutuskulttuurin takia. [1] EU:n tavoitteena on vähentää päästöjä 80–95 prosentilla vuoteen 2050 mennessä. Euroopan Unionin ilmasto- ja energiapaketissa vahvistettujen tavoitteiden mukaan kasvihuonekaasupäästöjä on vähennettävä 20 prosentilla, nostettava uusiutuvan energian osuus 20 prosenttiin ja tehostettava energian käyttöä 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä. Suomi toimii Euroopan Unionin osana kansainvälisessä politiikassa ja sitoutuu vähentämään päästöjä 80 prosentilla vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. [2]

Suomessa kaukolämmön ja sähkön tuotanto aiheuttaa noin kolmasosan kasvihuonekaasupäästöistä. Muita merkittäviä päästöjen aiheuttajia ovat teollisuuden prosessit, maatalous, liikenne ja jätehuolto. Kuva 1 käsittelee Suomen kasvihuonepäästöjakaumia sektoreittain vuoden 2011 ajalta. Energiasektori on selvästi merkittävin kasvihuonepäästöjen aiheuttaja. Rakennusten lämmitys on 8 % energiasektorin osuudesta, mutta tähän ei ole huomioitu rakennusten sähköenergian kulutuksen aiheuttamia päästöjä. Se on sisällytetty energiateollisuuden osuuteen. [3]



Kuva 1. Suomen kasvihuonekaasupäästöt sektoreittain vuonna 2011

Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2011 asumiseen käytetystä energiasta 84 prosenttia kulutettiin asuinrakennusten lämmitykseen ja 16 prosenttia kotitalouslaitteisiin. Kuva 2 käsittelee asumisen energiankulutuksen jakaumaa energialähteittäin vuoden 2011 ajalta. Asuinrakennusten lämmityksen energialähteistä yleisin oli kaukolämpö ja seuraavaksi eniten käytettiin puuta ja sähköä. Näiden kolmen energialähteen osuus oli 70 prosenttia lämmitysenergian kulutuksesta. [3]

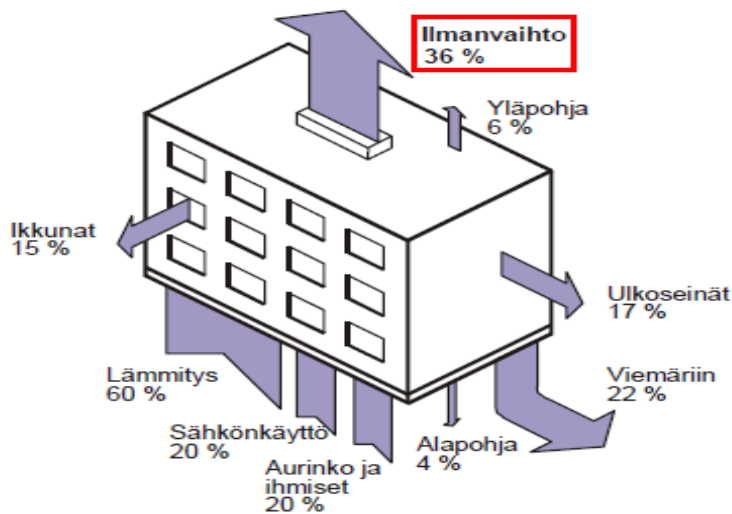


Kuva 2. Asumisen energiankulutus energialähteittäin vuonna 2011

Rakennusten energiankulutuksesta aiheutuvien kasvihuonepäästöjen vähentämisessä kustannustehokkaimmiksi tavoiksi ovat osoittautuneet energian tehokkaampi käyttö ja energiansäästö. Tästä syystä vuoden 2012 heinäkuussa voimaan astuneet uudet energiamääräykset kannustavat uusiutuvien energialähteiden hyödyntämiseen sekä energiankulutuksen kokonaisvaltaiseen hallintaan. Uudet energiamääräykset kiristävät määräystasoa 20% edelliseen verrattuna. Uusien määräysten myötä siirrytään energiatarkastelussa kokonaisenergiatarkasteluun, jossa huomioidaan kaikki rakennuksessa käytetty energia, energiamuodon kerroin, sekä rakennuksen tyyppi.[4]

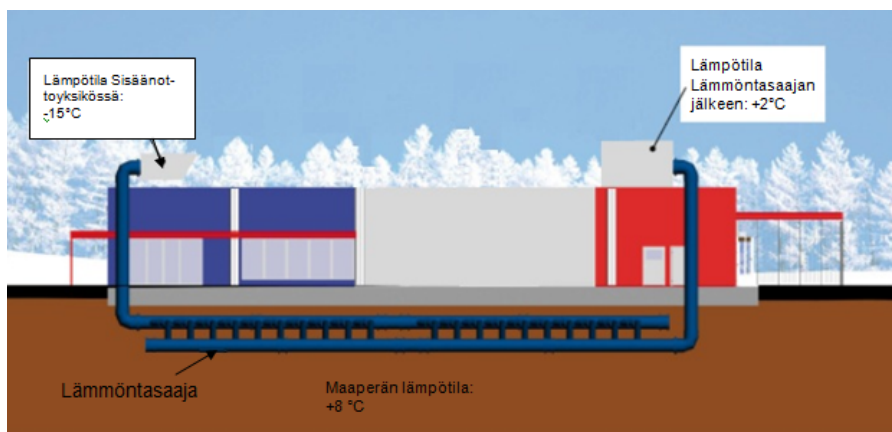
Asuinrakennusten kokonaisenergiankulutuksesta yli puolet muodostuu lämmitysenergiankulutuksesta. [5] Rakennuksen lämmitysenergiankulutuksella tarkoitetaan rakennuksen sisätilojen lämmitysenergian ja lämpimän käyttöveden lämmitysenergian yhteenlaskettua kulutusta. Rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus huomioi johtumislämpöhäviöiden ja lämmitysjärjestelmän häviöiden lisäksi vuotoilman ja ilmanvaihdon lämmityksen tarvitseman energian. [11] Jos rakennuksessa on jäähdytysjärjestelmä, myös jäähdytysenergiankulutus on huomioitava kokonaisenergianmäärässä. Kuvassa 3

on esitetty asuinrakennuksen lämpötase. Ilmanvaihdon kautta poistuu keskimäärin 36 % rakennukseen tulevasta lämpöenergiasta, joten se on myös suurin lämpöhäviöiden aiheuttaja.



Kuva 3. Asuinrakennuksen lämpötase ja ilmanvaihdon osuus energiankulutuksesta

Valtion teknologian tutkimuskeskus VTT:n tutkijan Jari Shemeikan tekemän selvityksen mukaan toimistorakennusten kokonaisenergiankulutuksesta keskimäärin 45 % käytetään sähköön, 10 % veden lämmitykseen sekä 45 % tilojen ja ilmanvaihdon lämmitykseen. [12] Toimistorakennuksissa sähköenergiankulutuksella on merkittävä osuus kokonaisenergiakulutuksesta. Sähköenergiaa käytetään mm. valaistukseen, toimistolaitteisiin, ilmanvaihtojärjestelmän puhaltimiin, rakennusautomaatioon sekä jäähdytysjärjestelmän ylläpitämiseen. Myös ilmanvaihdolla on suuri merkitys rakennusten energiankulutukselle. Ilmanvaihdon kautta häviää rakennusten lämpimästä ilmasta yli kolmannes. Tästä syystä ilmanvaihdon kautta menevän hukkaenergian vähentämisen on katsottu olevan tärkeä kysymys rakennusten energiansäästöissä. [5]



Kuva 4. Esimerkki lämmöntasaajan talvikäytöstä

Toimisto-, teollisuus- ja asuinrakennuksiin haetaan jatkuvasti taloudellisesti kannattavampia jäähdytys- ja lämmitysenergian säästökeinoja. Syynä on, että perinteisillä jäähdytys- ja lämmityskoneilla on korkeat käyttökustannukset. Korkeat energiahinnat pakottavat rakennuttajat ja suunnittelijat löytämään uusia tapoja kokonaisenergiakustannusten vähentämiseen. Keski-Euroopassa pitkään käytössä ollut lämmöntasaaja on tuottanut hyviä tuloksia ja on tulevaisuudessa lisääntymässä Suomessakin. Kuvassa 4 on esitetty, miten lämmöntasaaja esilämmittää koneellisen ilmanvaihdon tuloilmaa talvella maahan varastoituneen lämpöenergian avulla ja kuvassa 5, miten lämmöntasaaja jäähdyttää tuloilmaa kesällä, ilmaa huomattavasti viileämmän maaperän ansiosta. Kuvien esimerkitapauksissa tuloilma lämpenee talvella $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta $2\text{ }^{\circ}\text{C}$:een ja kesällä se viilenee $30\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta $16\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Kokonaisenergiakulutus laskee, kun tuloilman esilämmityksen tarve vähenee tai katoaa kokonaan ja kesäisin jäähdytyksen tarve pienenee. Tämä vähentää CO₂-päästöjä. [7]



Kuva 5. Esimerkki lämmöntasaajan kesäkäytöstä

Uusien rakentamismääräysten mukaan kesäkauden huonelämpötilan laskemiseen on käytettävä dynaamista laskentatyökalua. Laskelmissa otetaan huomioon vakioidut sää- tiedot, rakennuksen rakenteet, talotekniikka, sekä sisäiset lämpökuormat. Dynaamisella laskentatyökalulla laskettu huonelämpötila ei saa ylittää Suomen rakentamismääräyskoelma D3:ssa esitetyn jäähdytysrajan arvoa yli 150 astetuntia kesäkuun ja elokuun välisenä aikana. [8]

Halutun huonelämpötilan saavuttamiseksi kesäkaudella jäähdytysjärjestelmän käyttö voi olla tarpeellinen. Silloin kokonaisenergiankulutuksen laskelmissa otetaan huomioon myös jäähdytysjärjestelmän energiankulutus. Huoneilman yllilämpenemisen estämiseksi

rakennukseen voidaan suunnitella lämmöntasaaja ilmaa viilentämään. Lämmöntasaaja voi vähentää jäähtyksen tarvetta tai jopa poistaa muiden hallintatapojen tarvetta. Sen ansiosta voidaan saavuttaa pienempiä kokonaisenergiankulutuksia. Samalla järjestelmällä voidaan vähentää talvisin ilmanvaihdon lämmitykseen kuluva lämmitysenergiaa.

1.2. Tutkimuksen tavoitteet

Diplomityössä on tarkoitus esitellä lämmöntasaajan energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Työn tavoitteena on tutkia lämmöntasaajan soveltuvuutta toimistorakennuksiin Suomen olosuhteissa. Tässä työssä suunnitellaan lämmöntasaajajärjestelmä esimerkkirakennukseen ja tehdään tapaustutkimuksia, joissa vertaillaan keskenään rakenteellisten ja geologisten tekijöiden vaikutusta järjestelmän toimintaan. Esimerkkirakennuksena käytetään Aalto yliopiston toimistorakennuksista Metallimiehenkuja 10:tä, joka oli yksi Granlund Oy:n suunnittelukohteista.

Tässä diplomityössä esitetään myös ulkomailla toteutettuja esimerkkikohteita. Työn tärkeimpänä tavoitteena on luoda dynaaminen laskentatyökalu, jolla pystytään laskemaan ilmanvaihtojärjestelmän ulkoilman lämpötila annetulla järjestelmäkoolla, myös lämmöntasaajajärjestelmällä käytettyjä ja säästettyjä energiamääriä tunneittain.

1.3. Työn rakenne ja rajaus

Työ jakaantuu kirjallisuustutkimukseen sekä empiiriseen tutkimukseen. Luvut 2 ja 3 ovat kirjallisuustutkimusta, jossa käsitellään aiheeseen liittyvää teoriaa, vallitsevia olevia käytäntöjä ja aiempia tutkimuksia. Luvussa 4 kuvataan laskentamallit eri tapaustutkimuksien osalta. Luvussa 5 esitellään ja vertaillaan tuloksia eri tapaustutkimuksien osalta. Tutkimus rajataan toimistorakennusten ilmanvaihtojärjestelmän esilämmitys- ja esijäähtytysratkaisujen tarkasteluun ja uusiutuvan energiamuodon hyödyntämiseen toimistorakennuksissa Suomen ilmastossa.

1.4. Tutkimusmenetelmä

Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuustutkimusta ja dynaamista laskentatyökalua, jonka toiminta perustuu yhtälöiden laskemiseen Microsoft Excelissä ja Visual Basic-ohjelmiston laskentaprosessien valvomiseen.

2. Ilmanvaihtojärjestelmät suurkohteissa

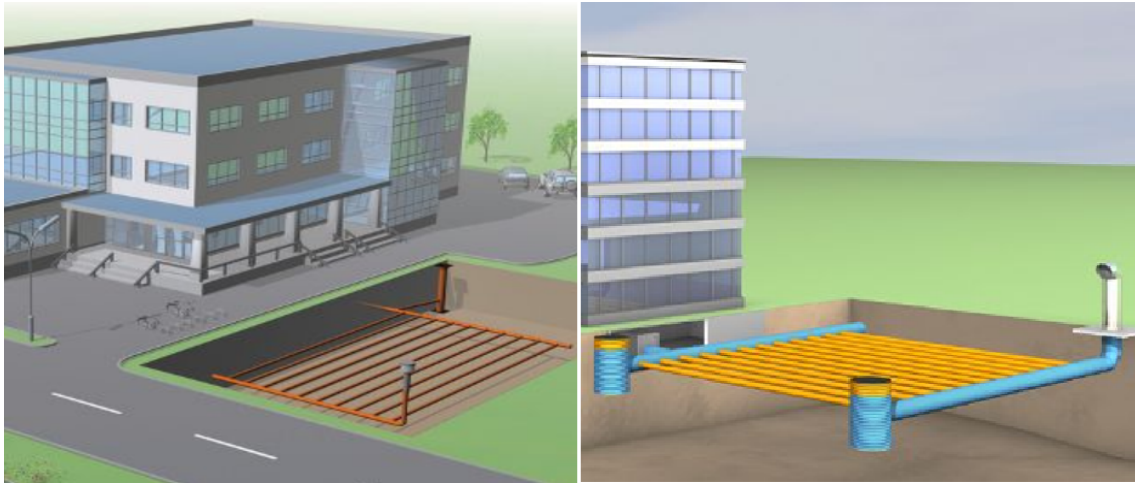
Ilmanvaihdon tarkoituksena on poistaa rakennuksen sisäilmaa ja tuoda sen tilalle puhdasta ulkoilmaa. Lisäksi sen tehtävänä on toimittaa rakennuksessa olevien ihmisten tai muiden olentojen hengitykseen tarvittavaa raitisilmaa ja poistaa ilmasta epäpuhtaudet. [13]

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D3 on esitetty rakennusten standardikäytön käyttöajat käyttötarkoituksen mukaan. Toimistorakennuksissa standardikäytön kellonajaksi on määritetty 07:00-18:00 sekä käyttöajaksi 11 tuntia päivässä ja 5 päivää viikossa. [8] Käyttöajan ulkopuolella voidaan pitää hygieniatilojen ilmanvaihtoa jatkuvasti käytössä tai ilmanvaihtoa jaksottaisella käytöllä. [9] Useissa toimistorakennuksissa käyttöajan ulkopuolella hygieniatiloja palvelevat poistopuhaltimet ovat päällä, jolloin ulkoilma virtaa sisälle aliapineen vuoksi. Lisäksi kesäaikaisen ylikämpenemisen estämiseksi yötuuletus johtaa ulkoilmavirtaa oleskelutiloihin käyttöajan ulkopuolella. Yötuuletus toteutetaan rakennuksen lämpökuorman mukaan joko jaksottaisesti tai jatkuvasti. Yötuuletukseen mitoitettujen ilmavirrat vaihtelevat tunneittain jäähdytystarpeen mukaisesti.

2.1. Ilmanvaihdon esilämmitys ja -jäähdytys lämmöntasaajalla

2.1.1. Yleistä järjestelmästä

Lämmöntasaaja ei ole uusi keksintö, Keski-Euroopassa sitä on käytetty pien- ja suurkohteissa jo vuodesta 2003 asti ja siitä on runsaasti hyviä käyttökokemuksia. Ilmaa jäähdytettiin myös 1. vuosisadalla ennen Kristusta Lähi-idässä ja Roomassa kanateissa, joita käytettiin kuljettamaan vettä. [25] Suomessa lämmöntasaajia on asennettu useisiin pientaloihin, mutta suurkohteista ei ole vielä kokemuksia. Routarajan alla, 1,5-3 metrin syvyydessä maaperän lämpötila on Suomessa reilusti plussan puolella talvella ja kesällä maaperä on huomattavasti ulkoilmaa viileämpi. [7] Kuvassa 6 on esitetty miten lämmöntasaaja voidaan sijoittaa maaperään suurkohteissa. Kuvassa huomataan järjestelmän peruskomponentteina sisäänottoyksikkö, jakoputket, lämmönsiirtoputket ja puhdistusluukut.



Kuva 6. Esimerkki lämmöntasaajan käytöstä suurkohteissa

Lämmöntasaajajärjestelmä käyttää hyväkseen maahan varastoitunutta energiaa ja esilämmittää ilmanvaihdon raitisilmaa talvella. Ilmanvaihtojärjestelmän raitisilma kiertää maanalaisessa putkistossa, mikä vähentää esilämmityksen tarvetta tai poistaa sen jopa kokonaan. Kesällä järjestelmä toimii vastaavasti raitisilman jäähdyttämisessä. Raitisilma kiertää maanalaisessa putkistossa ja luovuttaa lämpöä maaperään, minkä ansiosta raitisilman lämpötila laskee huomattavasti pienellä puhallinsähkökulutuksen lisäyksellä. [14]

Vaikka ulkona olisi pakkasta 5 - 15 astetta, lämmöntasaajajärjestelmä kykenee lämmitämään ilmanvaihtokoneelle tulevan ilman noin nollaan asteeseen. Kovemmalla pakkasella lämmöntasaaja kykenee leikkaamaan pahimman huipun pois, esimerkiksi jos ulkona on $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ astetta, lämmöntasaajan ansiosta ilma lämpenee -5 -asteeseen. Vaikka ulkona on todella kylmä, lämmöntasaajajärjestelmä pystyy parantamaan ilmanvaihtokoneen toimintaa. Talvella lämmöntasaaja nostaa tuloilman lämpötilaa riittävän korkeaksi niin, että lämmöntalteenottoyksikön jäätyminen estävää ohituspeltiä ei tarvita. Vastaavasti lämmöntasaajajärjestelmä parantaa jäätyminenestoprosessin toimivuutta, joten myös ilmanvaihto toimii paremmin. Lämmöntalteenottoyksikön jäätyminen estäminen parantaa ilmanvaihdon vuosihyötysuhdetta. [14] Lämmöntasaajajärjestelmä kykenee viilentämään kesähelteellä ulkoilmaa jopa 14 astetta, joten ilmanvaihdon jäähdytysenergian tarve vähenee tai jopa poistuu kokonaan. [16]

Lämmöntasaajajärjestelmän toiminta perustuu esisuodatuksella varustetun sisäänottoyksikön ja maahan upotettujen lämmönsiirtoputkien sisällä tapahtuvaan ulkoilman virtaamiseen. Talvella kylmä ilma imee lämpöä maaperästä kulkiessaan polypropeenista valmistetun lämmönsiirtoputken sisällä ja vastaavasti luovuttaa lämpönsä maahan kesällä. Tarvittaessa maakanavisto voidaan ohittaa ja ottaa ulkoilmaa suoraan ilmanvaihtokoneeseen. [15]

VTT:n tekemän tutkimuselostuksen mukaan lämmöntasaajajärjestelmä täyttää Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 vaatimukset, kun se toteutetaan ohjeisiin VDI-Richtlinien 4640 ja VDI-Richtlinien 6022 kuuluvien asiakirjojen mukaan. Joten huolellisesti toteutettuna järjestelmän maakanavisto soveltuu ilmanvaihdon ulkoilmakanavistoksi. [16]

2.1.2. Ulkoilman sisäänottotoiminto



Kuva 7. Järjestelmän ulkoilman sisäänottoyksikkö

Ulkoilmaa tuodaan lämmönsiirtoputkiin korroosionkestävästä teräksestä valmistetun sisäänottoyksikön kautta. Kuvassa 7 vasemmalla on esitetty järjestelmän sisäänottoyksikön suurkohteisiin tarkoitettu malli ja oikealla omakotitaloihin tarkoitettu malli. Järjestelmän vakioratkaisussa sisäänottoyksikkö on varustettu F6-luokan hienosuodattimella ulkoilman esipuhdistamiseksi. Tarvittaessa sisäänottoyksikön voi varustaa esim. hienosuodattimilla F7, erityisesti siitepölyn suodattamiseksi. Sisäilmaluokituksessa 2008 määritelty sisäilmastoluokka S3 edellyttää suodatusluokkaa F6. Sisäilmastoluokka S2 edellyttää suodatusluokkaa F7. Lisäksi sisäilmastoluokka S1 edellyttää suodatusluokkaa F8. S1- ja S2 sisäilmastoluokat edellyttävät yhtä luokkaa tehokkaampaa suodatuksen käyttöä, kun sisäänottoyksikkö sijaitsee vilkkaiden liikenneväylien ja muiden hiukkaslähteiden läheisyydessä (<150m).

Järjestelmän maakanavisto on vesi- ja ilmatiivis, joten maakanavisto ei heikennä suodatusprosessin tehokkuutta. Suodatustehokkuuteen vaikuttaa ulkoilman sisäänottoyksikössä myös otsapintanopeus, joka saa olla enintään 3m/s. [16] Suodattimen avulla ilman laatu paranee ja lämmöntasaajan kanaviston likaantumiseriski vähenee, mikä varmistaa hygieenisyyden ja paremman lämmönsiirron. [17]

Taulukko 1. Ulkoilmalaitteiden vähimmäisetäisyydet rakentamismääräysten mukaan

Ulkoilmalaitteen etäisyys	Etäisyys m
Jäteilmalaitteista	kuva 2
Ulkoilman laatua pilaavista lähteistä kuten jätteiden säilytyspaikoista, autojen pysäköinti- ja lastauspaikoista sekä ajoluiskista, tuuletusviemäreiden ja savupiippujen aukoista, keskuspölynimurin ulospuhalluksesta ja jäähdytystorneista	8
Tuuletusviemärin ja savupiipun aukosta, jos se on yli 3 m ulkoilma-aukkoa korkeammalla	5
Maanpinnasta ja pihatasosta	2
Kattopinnasta	0,9
Etäisyys voi olla pienempi, jos ilmanvaihtoa haittaavan lumipeitteen muodostuminen estetään jyrkän harjakaton avulla, lumisuojuksin tai muulla luotettavalla tavalla.	

Lämmöntasaajajärjestelmän sisäänottoyksikkö sijoitetaan siten, että Suomen rakentamismääräysten D2 osan ohjeelliset vähimmäisetäisyydet täyttyvät ja rakennukseen tuleva ulkoilma on mahdollisimman puhdasta sekä hajutonta. [9]

2.1.3. Kondenssiveden poisto



Kuva 8. Esimerkki järjestelmän kondenssiveden poistotavoista

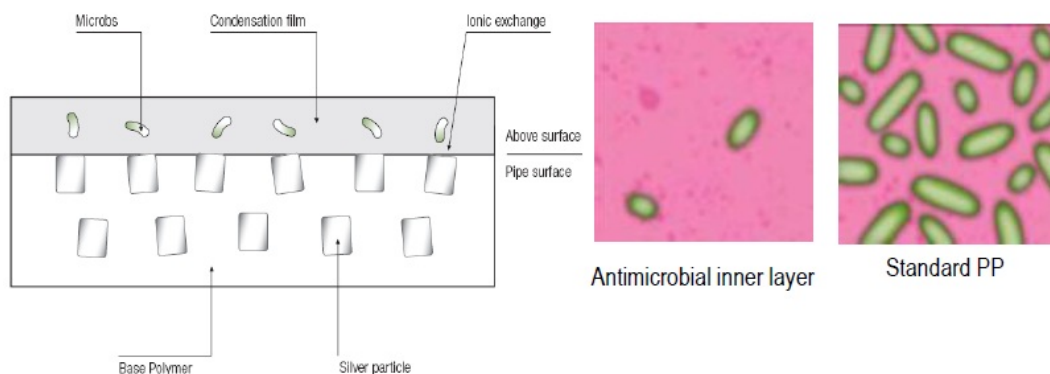
Ongelmana järjestelmässä on se, että kesällä ulkoilman kastepistelämpötilaa kylmempi putkiston pinta voi aiheuttaa veden kondensoitumisriskin. Järjestelmän toimivuuden varmistamiseksi ja hajuhaittojen estämiseksi, kondenssivesi on johdettava vedenkeruu-kaivoon tai poistettava vesilukon kautta. [7] Jos rakennuksessa ei ole kellarikerrosta,

kondenssiveden voi poistaa keräyskaivon kautta. Suodattamattoman ulkoilman pääsyn estämiseksi kanavistoon keräyskaivo on varustettu ilmatiiviillä umpikannella. Keräyskaivo sijoitetaan putkilinjan alimpaan kohtaan, niin että kondensoitunut vesi ei pääse kanavistoon. Kuvassa 8 esitetään kondenssiveden poistojärjestelmän komponenteista suurkohteisiin tarkoitettu ilmatiiviillä umpikannella varustettu keräyskaivo, kellaritörmäin pientaloihin tarkoitettu keräyskaivo ja kellarillisiin pientaloihin tarkoitettu kondenssiveden poistoputki.

Kanaviston kallistuksen tulee olla vähintään 2 %, jotta kondensoitunut vesi virtaa keräyskaivoon päin. Lopuksi kondensoitunut vesi pumpataan kaivosta tavallisella uppopumpulla kaivon läpiviennin kautta. Jos rakennuksessa on kellari, kondenssiveden voi poistaa rakennuksen sisäviemäröinnin kautta esim. kytkemällä lattiakaivoon. Kondenssivesi kertyy kanaviston matalimmassa kohdassa olevaan pieneen kaivoon ja poistuu poistoputkeen liitetyn kuulasifonin kautta. Kuulasifonin tehtävänä on estää viemärihajuksen pääsyn ilmakehään. [17]

2.1.4. Järjestelmän hygienia

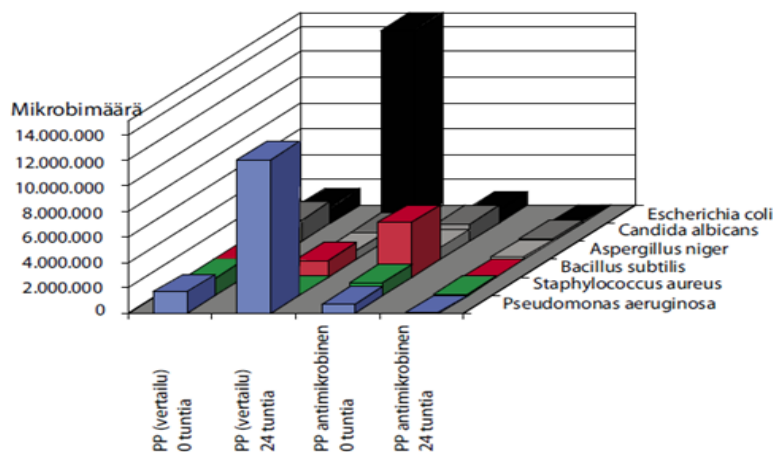
Antimikrobinen polymeeriresepti estää mikrobikasvustojen syntymisen kanavan sisäpinnoille pitäen rakennuksen tuloilman puhtaana. Muutoin kanavistoon voi syntyä sienten, homeiden ja bakteerien kasvustoja, jotka saattavat aiheuttaa ihmisille terveydellisiä ongelmia, kuten silmien punoitusta ja kutinaa, nuhaa, kurkun karheutta, äänen menetystä, yskää, hengenahdistusta, väsymystä ja päänsärkyä.



Kuva 9. Lämmönsaajan lämmönsiirtoputken rakenne

Antimikrobinen vaikutus saadaan aikaan integroimalla hopeahiukkasia raaka-aineeseen, jolloin ilmanvaihtokoneelle tulevasta ulkoilmasta saadaan hygieenistä ja lähes mikrobivapaata. [7] Kuva 9 käsittelee antimikrobinen pinnoitteen vaikutusta terveydelle haital-

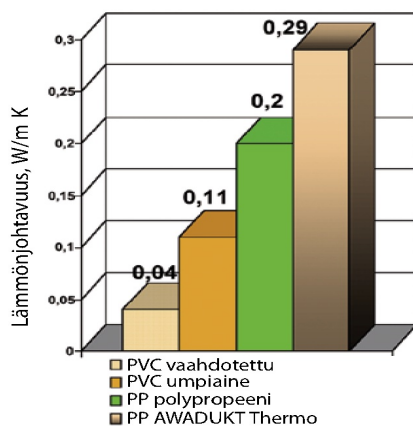
listen mikrobien kasvun estämiseen. Tavallisen polypropeeniputken käytöstä aiheutuisi huomattavasti enemmän kasvustoja. Kuva 10 käsittelee ASTM E2180 normin mukaisen testien tulokset, joissa seurattiin erilaisten terveydelle haitallisten organismien kasvua tavallisessa polypropeeniputkessa ja antimikrobiaineilla pinnoitetussa polypropeeniputkessa 24 tunnin sisällä. ASTM E2180 on standarditesti polymeeri- tai hydrofobisten materiaalien mikrobivastaisen aktiivisuuden määrittämiseen. Tulosten vertailujen mukaan lämmönsiirtoputkesta tulevasta ulkoilmasta saadaan poistettua lähes kaikki mikrobit.



Kuva 10. ASTM E2180- normin mukaisten testien tulokset

2.1.5. Järjestelmän lämmönsiirto-ominaisuudet

Lämmöntasaajajärjestelmän putket on valmistettu lämmönjohtavuuden suhteen parannetusta polypropeenista, jolloin voidaan saavuttaa hyvä lämmönsiirto maaperän ja ulkoilman välillä. Kuvasta 11 huomataan, että lämmöntasaajajärjestelmän putkella on parempi lämmönjohtavuus verrattuna vastaaviin putkimateriaaleihin. [17]



Kuva 11. Erilaisten putkien lämmönjohtavuuksien vertailu eri materiaalien välillä

Lämmönsiirtoputkien mitoituksessa pyritään turbulenttiseen virtaukseen, jotta optimaalinen lämmönsiirto toteutuu. Sitä varten ohjeelliseksi virtausnopeudeksi suositellaan maksimissaan 3 m/s, jotta painehäviöt eivät kasva haitallisiksi. [16]

Materiaalina polypropeeni kestää erittäin hyvin kuormitusta, lisäksi sen korkean taivutusjäykkyyden ansiosta kondenssiveden kertymistä ei synny. Kondensoitunut vesi virtaa suunnitellusti matalimpaan kohtaan asti ja se voidaan poistaa suunnitellulla tavalla. [17] Järjestelmän putket ovat korkealujuuksista ja massiiviseinämäistä materiaalia. Siksi maakanavisto kestää ulkopuolisen maantäytön, eikä tarvita suojaavaa sorakerrosta.

2.1.6. Järjestelmän tiiveys

Terveydelle haitallinen radon syntyy luonnossa uraanin ja toriumin hajoamisketjusta. Radonia esiintyy kaikkialla kallio- ja maaperässä. Se on väritön ja hajuton jalokaasu, joka kulkeutuu ilmakehään maanpinnan kautta. Tutkimusten mukaan radon aiheuttaa syöpäsairauksia, joten radonin pääsy sisäilmaan on estättävä.



Kuva 12. Lämmöntasaajaputken Safety-Lock tiivistys

Lämmöntasaajan osat ovat radontiiwiitä ja tiiveys varmistetaan erityisellä Safety-Lock-tiivisteellä. Asennettu varmuustiivisterengas on kiinteästi paikoillaan, eikä pääse siirtymään pois esim. asennuksen yhteydessä tai maan painumisen vuoksi. Safety-Lock-tiiviste on painetestattu ongelmitta normin EN 1610 mukaan ilmalla ja vedellä. [7] Tiiviskokeen voi tehdä joko vedellä koepaineilla 10–50 kPa tai ilmalla koepaineilla 1–20 kPa. [16]

2.1.7. Lämmöntasaajajärjestelmän asennus

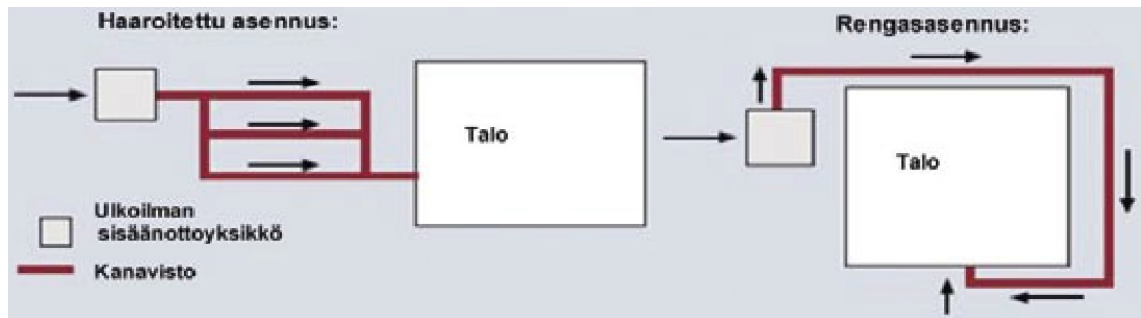
Lämmöntasaajajärjestelmän liitosten asennukset tehdään huolellisesti katkaisemalla kanavat suorassa kulmassa, seuraavaksi poistamalla jäykisteet liitospäistä ja tekemällä niihin viiste. Aluksi kanavien yhdistämiseen tarkoitetut EBDM-kumiset tiivisterenkaat puhdistetaan, niiden kunto tarkastetaan ja kanavat yhdistetään muhviliihtoksella. Viistotuun kanavapäähän laitetaan liukuainetta, jolla voidaan helpottaa liitoksen tekemistä ja kanava työnnetään pistomuhvin vasteeseen saakka. Kuvassa 13 esitetään lämmöntasaajan liitosten asennusvaiheet. Oikein asennettuna kanaviin ei kerry kondenssivettä, pölyä, eikä muita terveydelle haitallisia aineita. [16]



Kuva 13. Lämmöntasaajan putkien asennusta

Maaperässä syntyvän lämmönsiirron mahdollisimman tehokkaaksi hyödyntämiseksi otetaan huomioon monenlaisia seikkoja. Asennustyyppi on yksi tekijöistä, jotka vaikuttavat tuloksiin. Kuvassa 14 esitetään kaksi yleistä asennustyyppiä, joista rengasasennus on yleisin pienkohteissa ja haaroitettu asennus on suurkohteissa. Suurkohteissa haaroitettu asennus mahdollistaa ilmavirtausten automaattiseen tasapainottamisen, kun ilma virtaa kummallakin reitillä saman matkan ja samalla painehäviöllä. Kuvassa huomataan, myös että pienkohteissa ei tarvita suurikokoista vapaata asennusaluetta, kun putkistoa asennetaan rakennuksen ympärillä. Toisaalta suurkohteissa asennusalueeksi tarvitaan suurikokoinen avoin alue esim. urheilukenttä, puutarha-alue tai autoparkkialue. Kuitenkin joskus voi olla hyödyllistä laittaa järjestelmän putket perustusten alle, jolloin hyödynnetään osa alapohjan kautta karkaavasta johtumislämpöhäviöistä. On huomattava, että tämä asennusmenetelmä ei mahdollista auringonsäteilyn hyödyntämistä, joka nostaa

maan lämpötilaa. Mutta silti se tarjoaa tehokkaan ratkaisun ja säästää asennuskustannuksia. [31]



Kuva 14. Esimerkkejä lämmöntasaajajärjestelmän yleisimmistä asennusvaihtoehdoista

Lämmöntasaajajärjestelmä koostuu haaroitetussa asennuksessa lämmönsiirtoputkista ja jakoputkista, jotka jakavat ilmavirran lämmönsiirtoputkiin ja kokoavat taas lämmönsiirtoputkista. Putkien lisäksi järjestelmä sisältää liitäntäosia, puhdistusluukuja ja kondenssivedenpoisto-osia. Lämmönsiirtoputkien koot vaihtelevat Ø 200:sta Ø 500:an, materiaalina on käytetty polypropeeni ja sisäpinnalla antimikrobista pinnoitetta. Antimikrobisesti pinnoitettujen jakoputkien koot vaihtelevat Ø 315:sta Ø 500:an ja materiaalina käytetään polypropeeni. Suurien jakoputkien koot vaihtelevat Ø 800:sta Ø 1200:an ja materiaalina on käytetty polyeteeni. Suurissa putkissa ei ole käytetty antimikrobista pinnoitetta korkeiden kustannusten takia. Toisaalta niitä voi tuottaa sisäpinnalta antimikrobisesti pinnoitettuna ja kokonaan polypropeenisinä. Kyseessä on vain kustannuskysymys. [31]

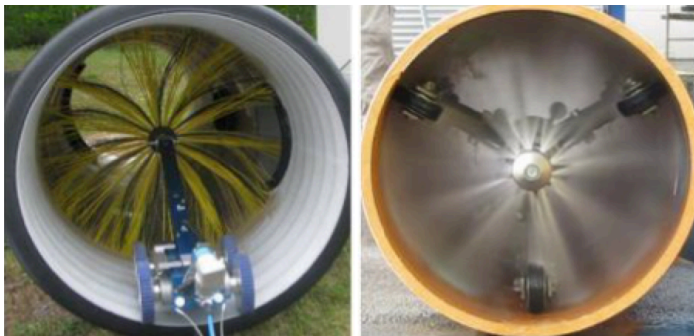
Putkien asennuksessa on otettava erityisesti huomioon etäisyys rakennuksen perustuksesta, joka suositusten mukaan on ainakin 1 metri. Haaroitetussa asennuksessa lämmönsiirtoputkien keskipisteiden välinen etäisyyden on oltava ainakin 1 metri. Putkien asennuksessa on otettava erityisesti huomioon kaltevuus, jolloin varmistetaan tiivistyvän veden poistuminen. [35]

Kun kaikki putket ovat asennettu ja tarkistukset tehty, jälkitäyttöprosessi alkaa, jolloin kaivanto täytetään sopivalla täyteaineella korkean termisen suorituskyvyn varmistamiseksi ja putken suojaamiseksi. Jälkitäytteenä aineen on oltava puhdas ja ilman teräviä esineitä. Jälkitäyttöaineella on oltava korkeat lämmönjohtavuudet. Täyttöaineena esi-

merkiksi savi on hyvin suositeltava korkean lämmönjohtavuuden ansiosta. Toisaalta soran käyttö täyttöaineena ei ole suositeltavaa matalan lämmönjohtavuuden takia. [35]

2.1.8. Järjestelmän kanavien puhdistus

Polypropeenimateriaalin hygieni ominaisuuksien ansiosta lämmöntasaajajärjestelmän putkien sisäpinnalle ei kerry öljyä tai muita epäpuhtauksia. [16] Lämmöntasaajajärjestelmän suunnitteluvaiheessa otetaan huomioon myös kanavien puhdistusmahdollisuudet, miten helposti voi tarkastaa kanaviston puhtautta ja puhdistaa putkien sisäpintoja säännöllisesti. Putkien sisäpintojen puhtaus on tarkastettava tarvittaessa kameralla ja kanaviston puhdistamiseksi harjapuhdistus tai korkeapainepesu on tehtävä ainakin keran vuodessa, jolloin varmistetaan ilman hygieenisuus sekä lämmönsiirron toimivuus. Lisäksi on helppo puhdistaa maakanaviston sisäpintoja kun niissä ei ole puhdistamista haittaavia sisäpuolisia jäykistyksiä eikä kannatuksia. [17]



Kuva 15. Lämmöntasaajaputkien puhdistusmenetelmiä: Harjapuhdistus ja korkeapainepesu

2.2. Kirjallisuuskatsaus

Uusiutuvana energiamuotona lämmöntasaaja on uusi järjestelmä Suomessa, vaikka se on ollut käytössä Keski-Euroopassa vuodesta 2003 asti. Toisaalta se on hiljattain leiytymässä pienkohteiden ja suurkohteiden lämmitys- ja jäähdytysratkaisuissa.

Vuonna 2011 Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC) on julkaissut tutkimuksen, jonka tavoitteena oli kerätä tietoja Kanadassa, Yhdysvalloissa ja Euroopassa toteutetuista rakennusten lämmöntasaajajärjestelmistä, tutkia järjestelmän soveltuvuutta Kanadan ilmasto-olosuhteisiin ja tehdä järjestelmän suorituskykyyn liittyviä johtopäätöksiä. Tutkimusmenetelmä perustui aiheesta tehtyihin julkaisuihin ja internet-hakuihin, suunnittelijoiden, asentajien, käyttäjien ja valmistajien välisiin sähköpostiviesteihin.

Kirjallisuus kertoo, että yhdysvaltalaiset ja kanadalaiset käyttäjät raportoivat olevansa yleisesti tyytyväisiä järjestelmiin. Kirjallisuuden mukaan osa käyttäjistä raportoi, että heidän järjestelmät eivät aina toimineet odotetulla tavalla. [18]

Kirjallisuudesta kerätyt tulokset osoittavat myös, että keskimäärin järjestelmästä saatu ilma on lämpimämpi kuin ulkoilma talvella, viileämpi kesällä ja järjestelmä näyttää olevan erittäin tehokas kuumina kesäpäivinä. Toisaalta Ruotsista kerätyt tiedot todistavat ilmanlaatuongelmista, jotka havaittiin lämmöntasaajalla varustetuissa passiivitaloissa. [18]

Kirjallisuuden mukaan järjestelmän 24/7 ympärivuoden toiminta ei ole hyödyllinen. On olemassa lukuisia raportteja järjestelmän lämpimän ilman tuotosta, kun kylmä ilma on tarpeen tai päinvastoin. Esimerkiksi kesällä voi olla hyödyllisempi pysäyttää lämmöntasaajajärjestelmä yöaikaan ja imeä ilmaa suoraan ulkoa, jos se on viileämpää. Ongelma on vallitseva myös syys- ja kevätkausilla. Esimerkiksi keväällä maaperän lämpötila on ulkoilman lämpötilaa jäljessä. Tästä syystä ilma pyrkii jäähtymään ja taloon toimitettu ilma ei ole riittävän lämmintä. Kirjallisuudesta kävi ilmi, että joissakin taloissa lämmöntasaajajärjestelmät oli rakennettu talojen perustusten ympärillä tai laatan alla ja niiden tavoitteena oli ottaa talteen talvella talossa tapahtuvia lämpöhäviöitä. Mutta tämä tilanne ei välttämättä ollut hyödyllinen, sillä perustuksien lämpötila on laskenut liian alhaiseksi ja tilanteella on ollut negatiivinen vaikutus talon termiseen tasapainoon. [18]

Tämä tutkimustyö on osoittanut, että lämmöntasaajasta on hyötyä oikeissa olosuhteissa käytettynä, mutta myös se on myös hyvin herkkä järjestelmä, joka on suunniteltava huolellisesti. Kirjallisuus näyttää, että huonosti suunniteltu järjestelmä ei toimi odotetusti tai seurauksena huono ilmanlaatu, pettymys järjestelmään ja jopa käytöstä poistaminen. Järjestelmän korjaaminen on usein vaikeaa jälkikäteen, kun kaivanto on täytetty uudelleen. Järjestelmän suunnittelussa on huomioitava myös se, että lämmöntalteenoton kanssa toimiessa järjestelmä tulee olemaan tarpeeton tietyn ulkoilmalämpötilan jälkeen, jolloin raitisilman sisäänotto suoraan ulkoa on kokonaisenergian kannalta edullisempaa. [18]

Vuonna 2012 Georgia Teknologia Laitoksen ja Kansanvälisen Vesi- ja Ympäristöteknologia Instituutin yhteistyönä tekemässä tutkimuksessa on tutkittu Länsi-Afrikan sisämaa Burkina Fason ilmasto-olosuhteisiin soveltuva lämmöntasaaja. Case-työnä he ovat luo-
neet yksinkertaisen laskentamallin, jolla voi laskea ulkoilman lämpötilamuutoksen lämmöntasaajaa käytettäessä. He ovat myös rakentaneet lämmöntasaajajärjestelmän teoreettisten tulosten kanssa vertailun tekemiseen. Tutkimustyössä tehtiin myös maaperän lämpötilamittauksia 1,5 metrin syvyydessä. Kuumimpaan aikaan päivästä klo 15:00, keskimääräinen ulkolämpötila oli 39 °C, mutta keskimääräinen maaperän lämpötila oli 30,4 °C 1,5 metrin syvyydessä. [19]

Kirjallisuus kertoo myös, että maailman kyltymätön energianajano kasvaa, kun köyhem-
mät maat teollisuustuvat. Koska kehitysmaissa ihmiset rikastuvat ja ensimmäisiä yllelli-
syyksiä hankittavaksi ovat lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät kodeissa sekä toimistois-
sa. Tästä syytä energiankysyntä tulee olemaan tulevaisuudessa erittäin kovaa kehitys-
maissa. Kun Yhdysvalloissa 87 %:lla kotitalouksista on ilmastointi, tämä määrä Intiassa
on vain 2 %. Arvion mukaan vuoteen 2030 mennessä intialaisissa kotitalouksissa käy-
tössä oleva ilmastointilaitteiden määrä saa kiinni Yhdysvaltojen määrän ja Intian ilmas-
to-olosuhteissa ilmastointilaitte voi muodostaa yli puolet kodin energiakulutuksesta, joka
nostaisi maan hiilidioksidipäästöjä hallitsemattomasti. Burkina Fason on erittäin köyhä
maa, jonka väestöstä 46,4 % elää köyhyysrajan alapuolella kansainvälisen valuuttara-
haston mukaan. Useammat kansalaiset tekevät työtä ulkona ja nukkuvat ulkona pysyäk-
seen viileinä. Tämä aiheuttaa ihmisille suuremman riskin sairastua malariaan tai joutua
villieläinten hyökkäyksen kohteeksi. [19]

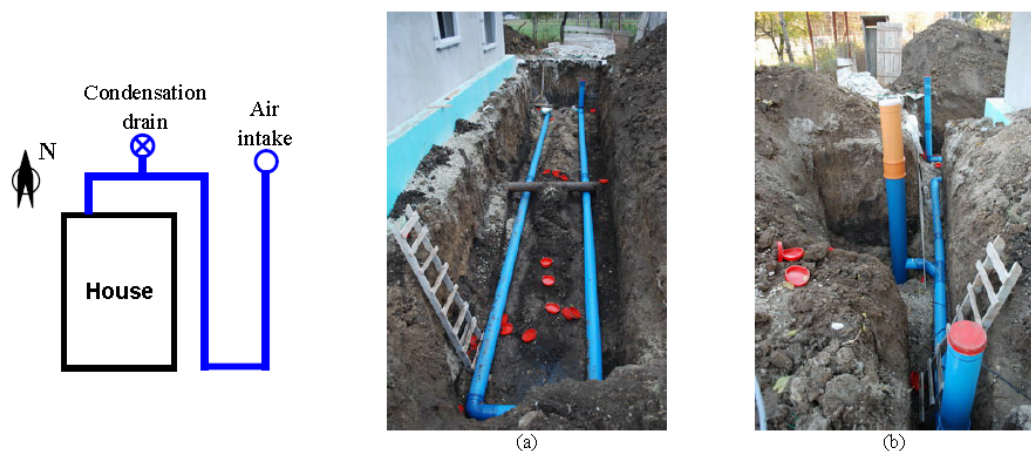
Tutkimustyössä luodulla laskentamallilla laskettiin, kuinka paljon ilma viilenee 25 m
pitkässä maaputkistossa, 1,5 metrin syvyydellä ja ilmavirran olleessa 95 m³/h. Tulokset
osoittivat, että järjestelmä kykenee viilentämään ilmaa 7,6 °C. Luotu teoreettinen malli
olettaa maaperän lämpötilan stationääriseksi eli muuttumattomaksi. Koejärjestely on
rakennettu teoreettisessa osuudessa käytettyjen lähtötietojen mukaan ja mittaukset suo-
ritettu maaperän eri syvyyksissä ja eripituisissa maaputkiston osissa. Koejärjestelyssä
kävi ilmi, että lämmöntasaajajärjestelmä voi viilentää ulkoa imettyä ilmaa yli 7,5 astet-
ta. Sen lisäksi äärimmäisestä ulkolämpötilasta huolimatta, joka vaihteli 25 °C:sta 43
°C:seen, maaperän lämpötila pysyi 1,5 m syvyydessä noin 30,4 °C:ssa. Tutkimuksen

tulokset osoittivat, että lämmöntasaaja on hyvä keino elämänlaadun parantamiseen ja sähkön kysynnän vähentämiseen kehitysmaissa. [19]

Lämmöntasaajajärjestelmää on tutkittu myös Romaniassa Bukarestin Politechnia yliopistossa vuonna 2010. Tutkimuksen tavoitteena oli matalaenergiarakennusten ilmanvaihdon esilämmittämiseen lämmöntasaajajärjestelmän suunnittelun laskentamallin luominen termisiä näkökulmia huomioon ottaen. [20]

Kirjallisuuden mukaan, lämmöntasaajajärjestelmän tehokkuus riippuu ilmasto-olosuhteista. Manner-alueilla, kuten Romaniassa, maaperän ja ulkoilman välillä lämpötilaero on yli 10 °C. Tarkemmin selitettynä Bukarestissa ulkoilman lämpötila vaihtelee -15 °C:sta 40 °C:seen, kun taas maaperän lämpötila vaihtelee vain 4 °C:sta 18°C:seen. Tämä tekee lämmöntasaajasta sopivan ratkaisun ilmanvaihdon esilämmitykseen talvella ja jäähdytykseen kesällä. [20] Kuvassa 16 on esitetty luonnosmalli ja kuvia yliopistoon rakennetusta passiivitalosta ja siihen asennetusta lämmöntasaajajärjestelmästä.

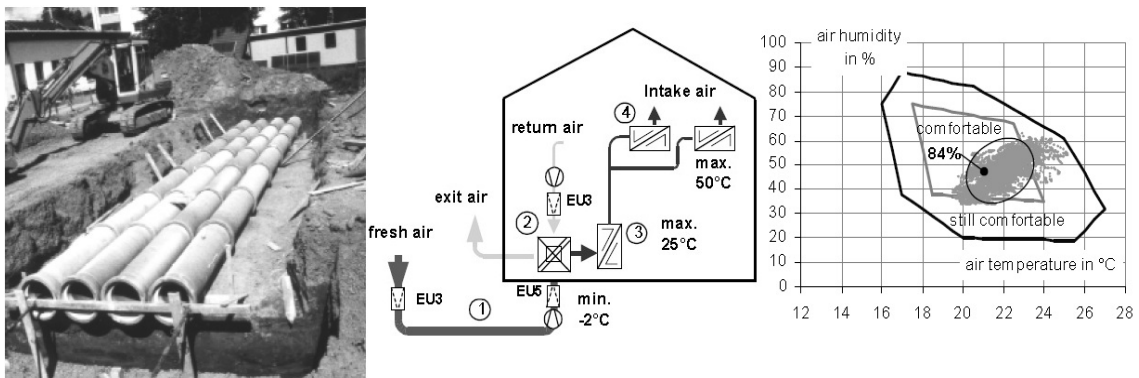
Tutkimustyön teoreettisessa osuudessa on luotu laskentamalli, joka olettaa maaputkistoa ympäröivä maaperän lämpötilan stationääriseksi eli muuttumattomaksi. Siis he käyttävät tietyssä syvyydessä maaperän vuoden keskimääräistä lämpötila-arvoa, joka todellisuudessa muuttuu vuodenajan mukaan. Tutkimustulokset osoittavat, että 38 metrin optimipituudella järjestelmä kykenee saavuttaman jopa 90 %:n lämpötilahyötysuhteen. [20]



Kuva 16. Lämmöntasaajajärjestelmän asennus. a) Järjestelmän pääosuus sisäänottoyksikön kanssa b) Lyhyt osuus kondenssiveden poiston kanssa

Saksan Marburgin Yliopistossa on tukittu myös lämmöntasaajajärjestelmää, jonka yhteydessä on luotu suunnittelulaskentamalli ja tehty vertailu Marburgin läheisyydellä rakennetun passiivinen toimistorakennuksen lämmöntasaajajärjestelmän mittaustulosten kanssa vuonna 2000. Toimistorakennuksen lämmöntasaajajärjestelmään kuuluu 4 rinnakkain kytkettyä betonirakenteista putkea, jotka ovat asennettu osittain talon perustusten alle, kuten on esitetty kuvassa 17. Maaputkiston pituus on 32 m, sen halkaisija on 0,5 m, putkien välinen etäisyys on 0,15 m ja upotettuna 1,5 metriin. [21]

Tutkimuksesta selviää, että järjestelmän toimittama energia riippuu vahvasti järjestelmän eri parametreista, kuten perustusten alla olevan osan pituudesta, paljaan maan alla olevasta pituudesta, syvyydestä, halkaisijasta, materiaaliin, putkien määrästä ja putkien välisistä etäisyyksistä. Yksityiskohtainen malli, joka tekee laskenta-ajan ja tarkkuuden välinen sovitteluratkaisun, on kehitetty eri parametrien vertailemiseksi. [21]

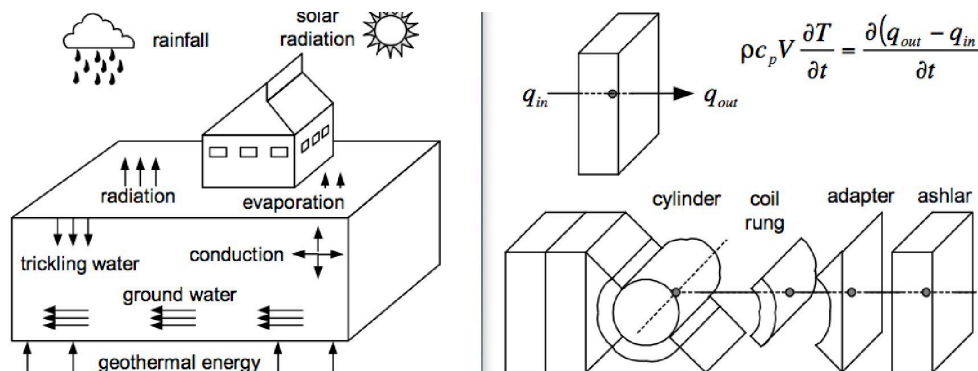


Kuva 17. Lämmöntasaaja ja ilmanvaihtojärjestelmien rakenteet ja tyytyväisyystaso

Kirjallisuus kertoo passiivirakennuksesta, että tarvittava ilmavirta oli $3400\text{m}^3/\text{h}$, joka vastaa maaputkistossa 1,2 m/s ilmavirran nopeutta. Tutkimustyössä lämpötilat on mitattu putkista eri etäisyyksissä ja eri syvyyksissä paljaassa maaperässä, sekä perustuksien alla olevalta osuudelta. Lisäksi ilman kosteusmittaukset on tehty ilman sisääntuloyksikössä sekä maaputkiston päädyssä. Radonin aiheuttamien terveydelle haitallisten sairauksien välttämiseksi on tehty myös mittaukset, joissa on todettu, että pitoisuudet eivät ylitä raja-arvoja. Toinen terveydelle haitallinen riski saattaa olla lisääntynyt bakteeri- tai homekuorma. Mittaustulosten mukaan bakteeri- ja homepesäkkeiden muodostumisen määrä on pieniä käytettäessä suodattimia. Alle 10 % tunneittain keskiarvoista kosteus nousi yli 80 %. Lämpötila- ja kosteusmittausten mukaan kesällä 84 % kaikista tapauksista mitatut arvot osoittavat viihtyisää sisäilmaa, kun talvella viihtyisyyden osuus tulee

olemaan 58 %. Loput ajasta ilmanlaatu oli ainakin tyydyttävällä tasolla. Kesäajan lämpötila- ja kosteusmittausten tulokset ovat esitetty kuvassa 17. [21]

Ulkoilman laskettu minimilämpötila on -4 °C, jotta LTO-yksikön jäätymistä ei tapahdu kun on käytössä 80 % lämpötilahyötysuhteinen lämmöntalteenottoyksikkö. Ilmavirran lämpötilamittausten mukaan ulkoilman lämpötila lämmöntasaajan jälkeen oli ainakin -2 astetta. Lämmöntasaajajärjestelmä toimii ympäri vuoden, siis lämmöntasaajajärjestelmästä puuttuu ohitustoiminta. Tämä on aiheuttanut joskus ilmanvirran jäähtymistä talvella, lämpenemistä kesällä ja sen seurauksena ilmaisen energiamäärä on laskenut. Rakennuksen kokonaisilmaisen energia, joka on saatu lämmöntasaajajärjestelmän lämmitys ja viilennys toiminnoista, on 7 MWh/a. Lämmöntalteenottoyksikön tuottama ilmaisen energia on 54,2 MWh/a ja lämmöntasaajan lämmitystoiminnan tuottama ilmaisen energiamäärä on 5,3 MWh/a. Kirjallisuudessa tehdyn johtopäätöksen mukaan lämmöntasaajan tuottama ilmaisen energian osuus on hyvin alhainen huonosta suunnittelusta johtuen. [21]

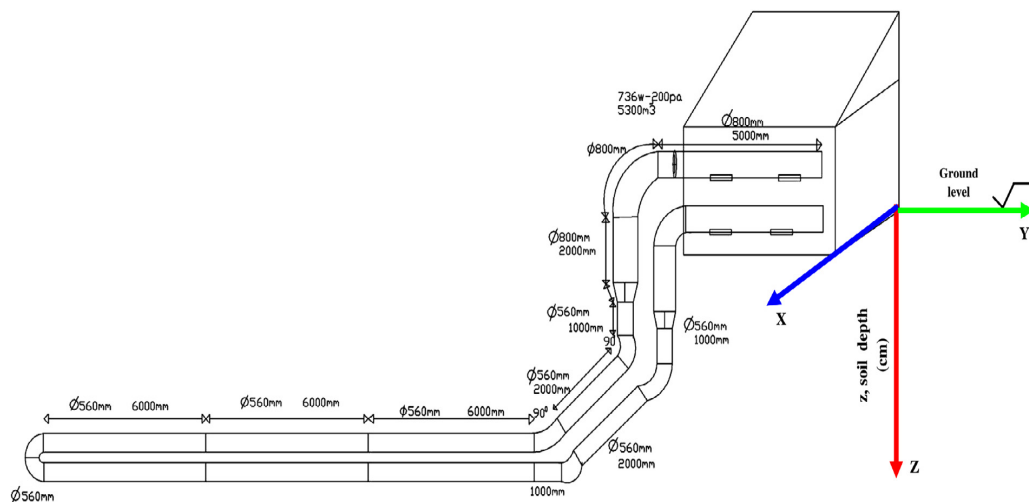


Kuva 18. Maaperän lämpötilaan vaikuttavat tekijät ja laskentamallin poikkisuunnassa yhden palan solmut

Maaperän lämpötilaan vaikuttavat eri suuruudet, kuten geotermien energia, pohjavesi, johtuminen, maanpinnassa tapahtunut haihtuminen ja säteily, auringon säteily ja sateet. Kirjallisuuden mukaan sateen ja geotermisen energian vaikutuksen voi jättää huomiotta. Laskentamallin rakenne jakaantuu poikkisuunnassa useisiin paloihin ja jokaiseen palaan kuuluu sylinteri muodossa ilma, putken neljännekset, jatkokappaleet ja peräkkäiset suoraosuudet. Nämä kaikki muodostavat soluja ja kaikki solut ovat vuorovaikutuksessa toisiinsa radiaalisuunnassa. Kirjallisuus kertoo, myös että maaperän laskettujen ja mitattujen lämpötila-arvojen välinen vertailu näyttää hyvää yhteensopivuutta. Laskentamallin ja mittaustulosten lämpötilaero vaihtelee 0,2 °C ja 0,7 °C välillä ja tämä johtaa 10 %:n virheeseen toimitetusta energiasta. Perustusten alla tehtyt mittaukset osoittavat 12 °C

lämpötilaa talvella ja tästä syystä laskentamallikin osoittaa myös korkeampaa tehoarvoa, kun lämmöntasaajajärjestelmä on rakennettu kokonaan rakennuksen alle. Laskentamalli näyttää, että lämmitysteho olisi 15 % pienempi jos järjestelmä olisi ollut rakennettuna kokonaan paljaassa maaperässä, siis rakennuksen ulkopuolelle. Mutta sama laskentamalli näyttää, myös että lämmitysteho olisi 22 % suurempi jos järjestelmä olisi ollut rakennettuna kokonaan perustusten alla. [21]

Lämmöntasaajajärjestelmä on suunniteltu ja asennettu myös Turkin Izmirissä. Ege Yliopiston Aurinkoenergianinstituutista Önder Özgener ja Leyla Özgener tekivät asiasta tutkimustyötä. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia järjestelmän suorituskykyä ja ominaisuuksia U-muotoon upotetussa maanalaisessa putkistossa, joka on pituudeltaan 47 m ja nimellishalkaisijaltaan 56 cm. Kuvassa 19 on esitetty kaavio kasvihuonerakennukseen asennetusta lämmöntasaajasta putkikokojen ja pituuksien kanssa. Järjestelmän tehtävänä on lämmittää kasvihuonerakennus talvella. Tämä tutkimus osoittaa lämmöntasaajajärjestelmän soveltuvan vaihtoehtojärjestelmäksi kasvihuoneiden lämmittämiseen. Suunniteltu lämmöntasaajajärjestelmä viilentää sisäilmaa kesäisin ja lämmittää talvella maataloustuotteiden tarpeiden mukaan. Imupuolelle sijoitettu ilmapuhaltimen ilmavirta oli $5300 \text{ m}^3/\text{h}$. [22]



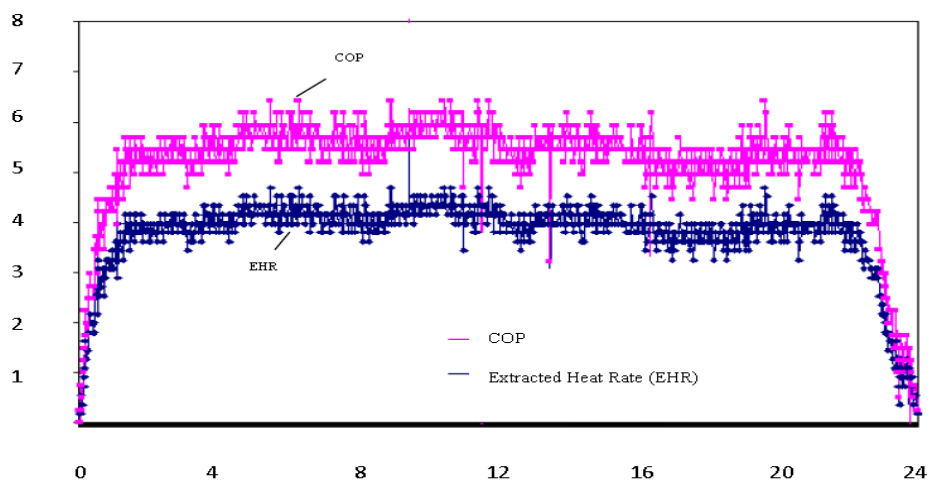
Kuva 19. Turkin Izmirissä kasvihuonerakennukseen asennetun järjestelmän kaavio

Järjestelmän putkimateriaalina on käytetty sinkittyä terästä ja putkisto on upotettu maahan 3 metriin syvyyteen. Putken viimeiselle 15 metrin osuudelle on käytetty halkaisijaltaan suurempaa putkea, jotta saavutettaisi pienempi puhallusnopeus kasvihuoneessa ja pienempi sähkönkulutus puhaltimessa alhaisten painehäviöiden johdosta. Kirjallisuuden

mukaan asennuspaikan maaperä koostui savesta, hiekasta ja pienistä kivistä. Mittausaikana näyte on otettu 3 m syvyydestä ja termiset ominaisuudet ovat testattu. Lämmönjohtavuuden on arvioitu olevan 2,85 W/mK. Lisäksi on mitattu ilman, putkipinnan ja maaperän lämpötilat eri kohdissa. Tutkimustulokset perustuvat lämmityskäytössä tehtyihin mittauksiin. Mitattujen suureiden avulla lasketaan jokaisille tunneille lämpötehoarvot. Järjestelmän lämpökerroin (COP) on laskettu maaputkiston tuottaman lämpötehon ja maaputkistossa ilman liikuttamiseen tarvittavan puhaltimen tehon avulla. [22]

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{W_p} \quad (1)$$

missä \dot{Q}_L on järjestelmän tuottama lämpöteho [W] ja W_p on puhaltimen käyttämä teho [W]. Mittaustulosten mukaan kasvihuoneen sisäilman korkein lämpötila vaihteli 12,1 °C ja 25,2 °C välillä kun alin ulkoilman lämpötila vaihteli 4,7 °C ja 13 °C välillä. Tulosten mukaan kasvihuoneen vuoden keskimääräinen lämpötila oli 20,2 °C, kun ulkoilman keskimääräinen lämpötila oli 12,98 °C. Lisäksi kirjallisuus osoittaa, että saavutettu maksimi lämpöteho oli 4,5 kW, maksimi lämpökerroin oli 6,42, minimi lämpökerroin oli 0,98 pilvisen ja kylmän päivän lopussa ja lämmityskaudella keskimääräinen lämpökerroin oli 5,16. Kuvassa 20 nähdään asennetun lämmöntasaajajärjestelmän laskettujen lämpötehon ja lämpökertoimen tunnitaiset arvot mittaussajalta 29 marraskuuta 2009. Koetulokset osoittavat, että tätä järjestelmää voi käyttää kasvihuoneiden lämmitykseen Turkissa Välimeren ja Egeanmeren alueilla. Tulosten mukaan, järjestelmä pystyi toimittamaan 60,8 % suunniteltua lämmityskuormaa kylminä talvipäivinä. [22]



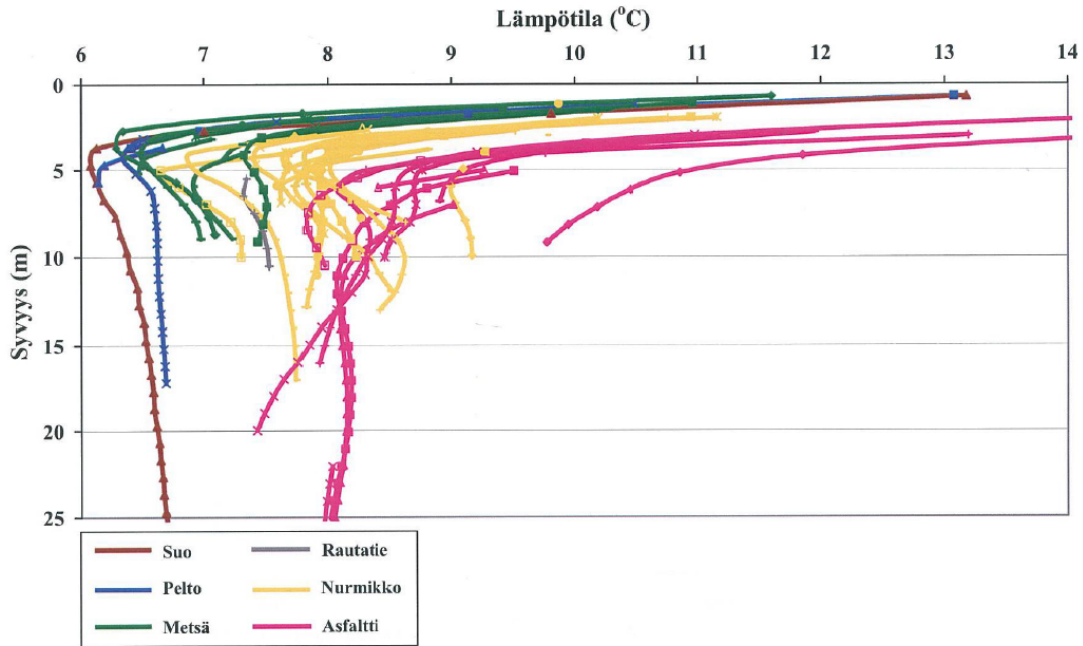
Kuva 20. Lämmöntasaajajärjestelmän lämmitystehon ja lämpökertoimen tunnitaiset arvot

Oulun yliopistosta Nina Leppäharju on tehnyt pro gradu-työnsä Työ- ja Elinkeinoministeriön alaiselle Geologian tutkimuskeskukselle. Työn tehtävä oli edistää maa- ja kalliolämmön hyödyntämistä ja tutkittiin maalämmön hyödyntämiseen vaikuttavia geofysikaalisia ja geologisia tekijöitä sekä ihmisen toiminnan aiheuttama maapinnan lämpötilan muutosta tarkastelemalla Espoon kaupungin pohjaveden havaintoputkista kesällä 2007 mitattua lämpötila-aineistoa. Tutkimustyön mukaan maankamaran lämpötila määräytyy pääosin maanpinnan vuosittaisen keskilämpötilan mukaan, joka on Suomessa pari astetta ilman vuosittaista keskilämpötilaa korkeampi. [23]

Havaintoputkissa tehtyjen lämpötilamittausten perusteella kävi ilmi, että metsäalueilla maanpinnan lämpötila on keskimäärin 7 astetta, asfaltoiduilla alueilla ja nurmikoilla maanpinnan keskilämpötila on 1-2 astetta, myös rakennusten pohjalla noin 7 astetta korkeampi luonnontilaiseen metsämaahan verrattuna. Taulukossa 2 esitetään maanpinnan lämpötilamittausten tulokset ja niistä lasketut keskimääräiset arvot. Mittaustuloksista huomataan sen, että vaikka asfaltti alueiden maanpinnan lämpötila nousee kesällä selvästi korkeammaksi kuin metsässä ja nurmikolla, maanpinnan keskilämpötila ei ole juurikaan nurmikkoalueiden maanpinnan keskilämpötilaa korkeampi. Tähän voi olla syynä talviajan kylmät pintalämpötilat tai asfaltoitujen alueiden huonosti lämpöä johtavat tierakenteet. Vaikka pinta on lämmin, lämpö ei johdu alempiin rakenteisiin kunnolla. [23]

Taulukko 2. Maanpinnan mittaustulokset ja keskilämpötilat

Ryhmä	Maanpinnan mittaustulokset T [°C]	Maanpinnan keskilämpötila T ₀ [°C]
Metsä	6,5 - 7,5 [°C]	7 [°C]
Nurmikko	7,5 – 9 [°C]	8 [°C]
Asfaltti	7,5 – 9,5 [°C]	8,5 [°C]
Rakennus	14 – 15 [°C]	14 [°C]
Kallio		7 [°C]



Kuva 21. Heinäkuussa mitatut lämpötila-syvyys-käyrät

Kuvassa 21 esitetään heinäkuun aikana mitatut lämpötila-syvyys-käyrät, joista huomataan, että metsäryhmään kuuluvat lämpötila-syvyys-käyrät ovat sijoittuneet koko käyräjoukon vasempaan reunaan, asfalttiryhmään kuuluvat oikeaan reunaan ja nurmikkoryhmään kuuluvat jäävät kahden edellisen väliin. [23]

Tutkimus kertoo myös, että maapallon sisällä lämpötila muodostuu sisäsyntyisen lämmön johtamasta lämpövuon tiheydestä ja auringon säteilyn määräämästä maapinnan lämpötilasta. Maanpinnan lämpötila muuttuu auringon säteilyn kanssa ajan suhteen, jolloin pintalämpötilan muutoksia esiintyy vuorokausi- ja vuosisykleissä. Auringon säteilyn vaikutuksesta pinnan lämpötilamuutokset siirtyvät alaspäin maa- ja kallioperään samalla vaimentuen. [23][24] Kaavan (2) mukaan voidaan laskea teoreettiset lämpötila-syvyyskäyrät jokaiselle vuodenajalle.

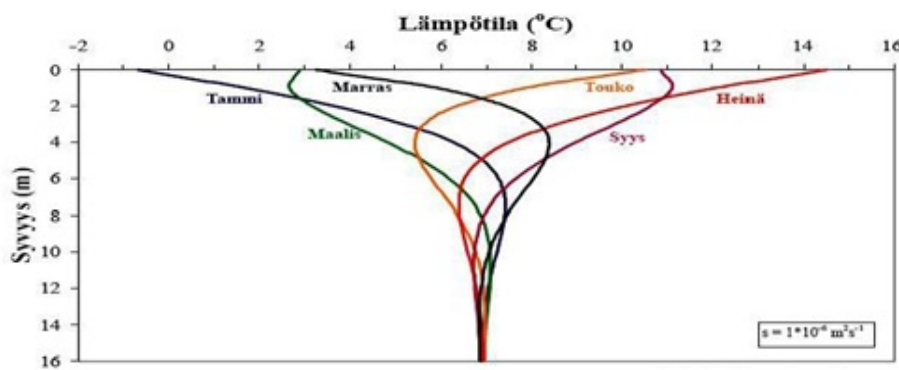
$$T(z, t) = A_p e^{-z/d} \cos\left(\omega t - \frac{z}{d}\right) + T_0 \quad (2)$$

missä A_p [°C] on maanpinnan lämpötilavaihtelun amplitudi, z [m] on syvyys, d [m] on maanpinnan lämpötilavaihtelun tunkeutumissyvyys, ω [rad/s] on pintalämpötilan vaihtelu kulmataajuudella, t [s] ajanhetki, T_0 [°C] on pintalämpötilan vaihtelun keskiarvo eli maanpinnan keskilämpötila. Tunkeutumissyvyys d [m] lasketaan kaavalla

$$d = \sqrt{\frac{2s}{\omega}} = \sqrt{\frac{2k}{\rho c \omega}} \quad (3)$$

jossa $s = \frac{k}{\rho c}$ [m^2/s] on termien diffusiviteetti, k [W/mK] on maalajin lämmönjohtavuus, ρ [kg/m^3] on maalajin tiheys ja c [J/kgK] on ominaislämpökapasiteetti. Tunkeutumisvyvyys riippuu siis pintalämpötilan vaihtelun taajuudesta, joten mitä pidempijaksoisesta vaihtelusta on kyse, sitä syvemmälle sen vaikutukset yltävät. Maankamarassa syvyydellä 5d pintalämpötilan vaihtelun amplitudi on alle 1 % pintalämpötilan vaihtelun amplitudista, eli se on käytännössä mitätön. [24] Jos maalaji on kallio, jonka termien diffusiviteetti on $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, päivittäisen pintalämpötilan vaihtelu ulottuu syvyydelle $5d \approx 85 \text{ cm}$ ja vuosittaisen syvyydelle $5d \approx 16 \text{ m}$. Toisaalta irtomaalajien termien diffusiviteetti on pienempi kuin kallion, jolloin muutoksen syvyysulottuvuus pienenee. Käytännössä vuosittainen pintalämpötilan vaihtelu voidaan havaita maankamarassa korkeintaan 10–15 metrin syvyydelle asti. [23]

Kallioalueilla maankamaran laskettu lämpötila-syvyyskäyrä on ollut kuten kuvassa 22, kun maanpinnan keskilämpötilaksi valittuna 7°C , pintalämpötilan vaihtelun amplitudiksi valittuna 8°C ja termien diffusiviteetin arvoksi laskettuna $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Kuvan 22 mukaan maanpinnan lämpötila vaihtelee ulkoilman lämpötilan mukaan ja pintalämpötilan vaihtelu vaikuttaa maankamaran lämpötilaa 10–15 metrin syvyydelle asti. Noin 15 metrin syvyydeltä lähtien maankamaran lämpötila on vuodenajasta riippumaton ja lämpötila on pintalämpötilan vaihtelun keskiarvo. [23]



Kuva 22. Maankamaran lämpötila eri vuodenaikoina

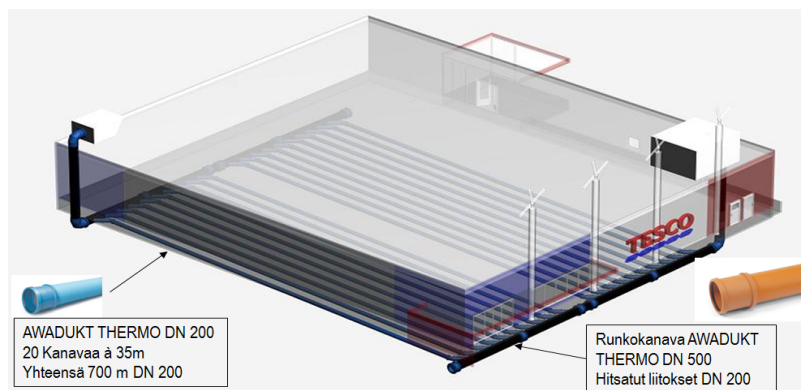
Kirjallisuuden mukaan Suomessa vuosittaisen ilman keskilämpötilan T_A [$^\circ\text{C}$] ja maanpinnan keskilämpötilan T_0 [$^\circ\text{C}$] välillä on myös lineaarinen riippuvuus, jonka voidaan määrittää seuraavasti. [23]

$$T_0 = 0,71 \cdot T_A + 2,93 \quad (4)$$

2.3. Rakennettuja esimerkkikohteita

Lämmöntasaajajärjestelmiä on asennettu asuntoloihin, kauppakeskuksiin, kouluihin, kongressikeskuksiin, teollisuusrakennuksiin, toimistoihin ja viihdekeskuksiin. Tässä diplomityön osassa esitetään esimerkkikohteita, johon lämmöntasaajajärjestelmä on asennettuna. Lisäksi esitetään järjestelmistä saatuja mittaustuloksia.

Puolan Zdziechowiceen vuonna 2007 rakennettu TESCO kauppakeskus on yksi suurimmista päivittäistavaraketjuista. Projektin tarkoituksena oli hyödyntää maaperänenergiaa uusiutuvan energian lähteenä. Rakennuksen alle rakennettu lämmöntasaajajärjestelmä esilämmittää ja esijäähdyttää ilmanvaihdon tuloilmaa. Järjestelmän maaputkisto muodostuu 20 lämmönsiirtokanavasta, joiden pituus on 35 m ja koko on Ø 200. Järjestelmän maaputkisto sisältää myös 2 runkokanavaa, joiden koko on Ø 500. Kuvassa 23 on kuvattu kauppakeskuksen alle asennetun lämmöntasaajajärjestelmän putkiosia ja katolla sijaitseva sisäänottoyksikkö sekä ilmanvaihtokone. [6]

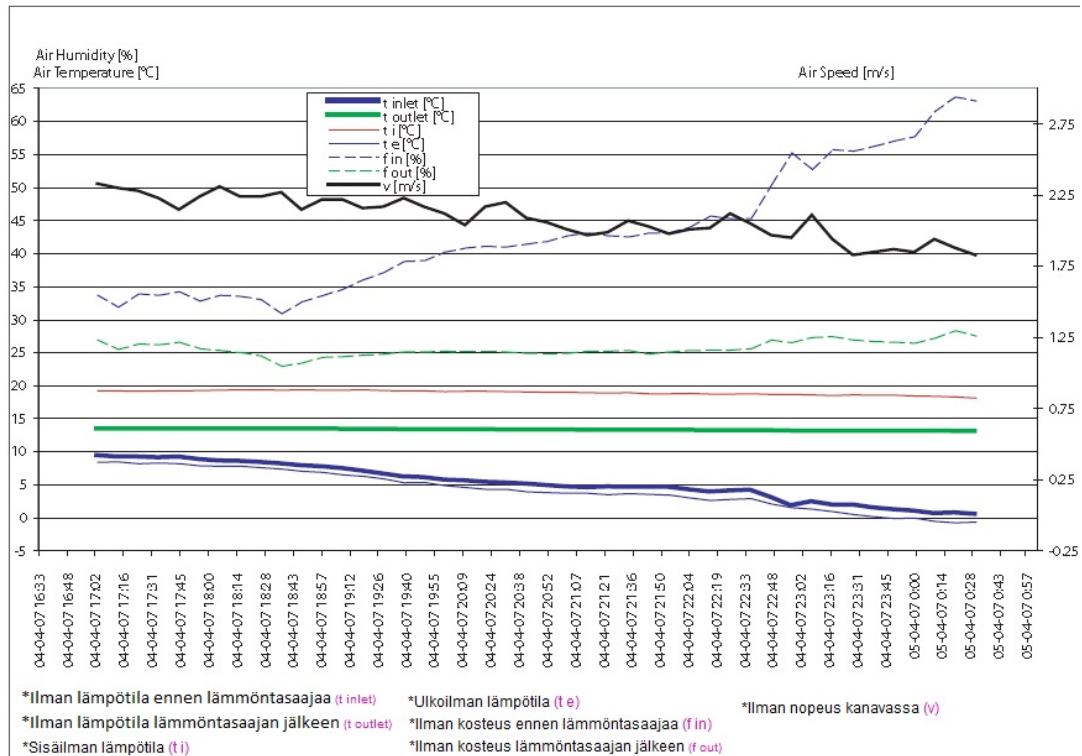


Kuva 23. Lämmöntasaajajärjestelmän asennussuunnitelma

Järjestelmän suunnittelun mukaan, talvella kun ilman lämpötila on -15 °C ja maaperän lämpötila on 8 °C, lämmöntasaajajärjestelmä pystyy lämmittämään ilmaa 2 °C asti. Täten rakennus säästää 20500 kWh energiaa vuotuisesta lämmitystarpeesta, joka on 46320 kWh. [6]

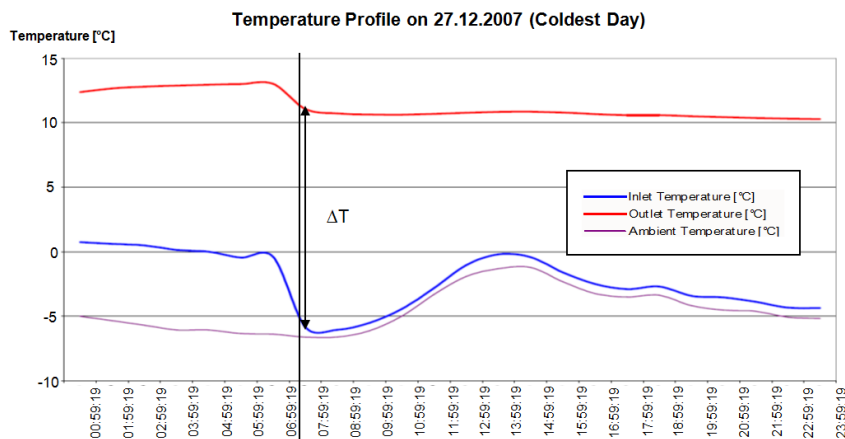
Vastaavasti kesällä, kun ilman lämpötila on 30 °C ja maaperän lämpötila on 8 °C, lämmöntasaaja pystyy jäähdyttämään ilmaa 16 °C:seen asti. Täten rakennus säästää 10700 kWh energiaa vuotuisesta jäähdytystarpeesta. Laskelmissa käytetty ilmamäärä oli 2700 m³/h ja ilmanvaihtokone oli varustettu lämmöntalteenotolla. [6]

Käyttöaikana mittaukset ja tulosten analysoinnit ovat tehty Poznanin Yliopiston toimesta vuoden ajalta 4.2007 – 4.2008. Mitatut parametrit olivat ulkolämpötila, sisälämpötila, ilman nopeus kanavassa, ilman lämpötila ennen lämmöntasaajaa, ilman lämpötila lämmöntasaajan jälkeen ja ilman kosteus. [6]



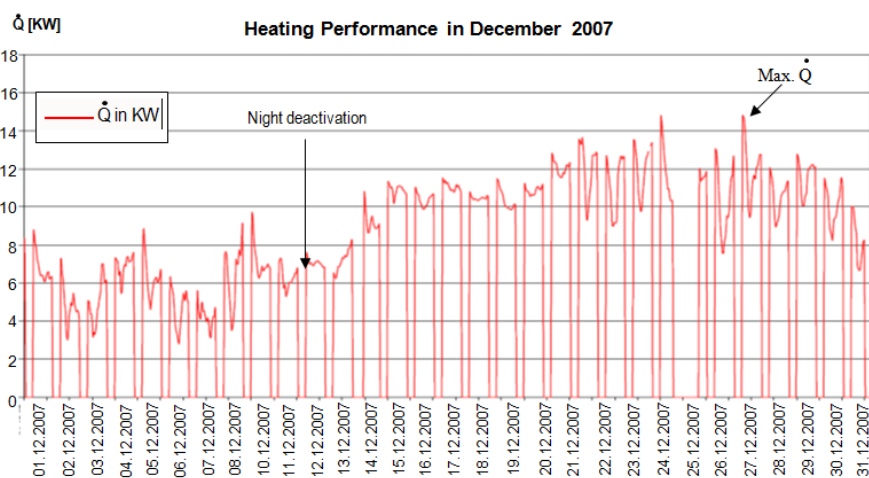
Kuva 24. Mittaustulokset lämmityskaudelta

Kuvassa 24 huomataan, että ilma on lämmennyt lämmöntasaajan ansiosta -2 asteesta 13 asteeseen ja pysynyt vakiona. Siis lämpötilaero (ΔT) oli 15 astetta. Lämmöntasaajan jälkeen ilma on lämmennyt ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenottoyksikön avulla sopivaksi tuloilmalämpötilaksi. [27]



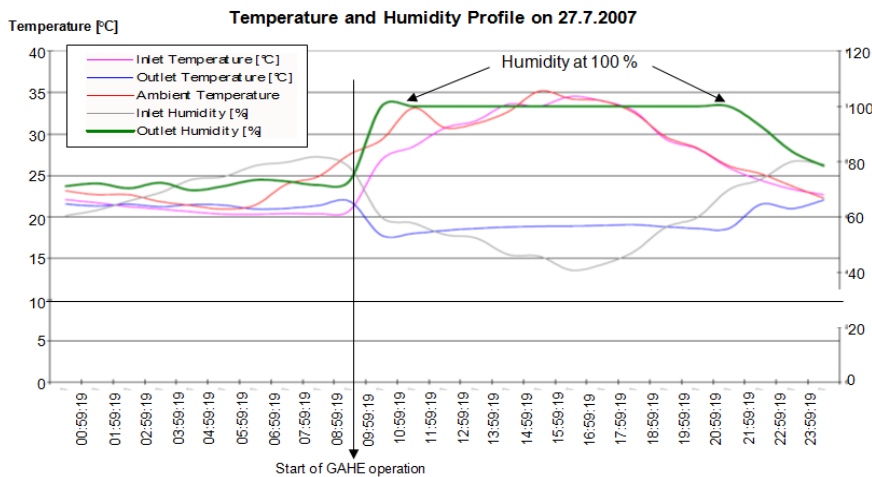
Kuva 25. Mittaustulokset kylmimmältä vuodenajalta

Kuva 25 esittää kylmimmän vuodenaajan lämpötilamittausten tuloksia. Mitatut parametrit olivat ilman lämpötila lämmönsiirtoputken alkupäässä, ilman lämpötila lämmöntasaajan jälkeen ja ulkolämpötila. Ilma on lämmennyt lämmöntasaajan ansiosta -7 asteesta 11 asteeseen. Eli lämpötilaero (ΔT) on ollut 18 astetta. Lämmöntasaajajärjestelmän maksimilämmitystehoksi on laskettu 15 kW. Normaaliolosuhteissa, jos ulkolämpötila olisi -16 °C, maksimi lämmitysteho olisi 20 kW. [6]



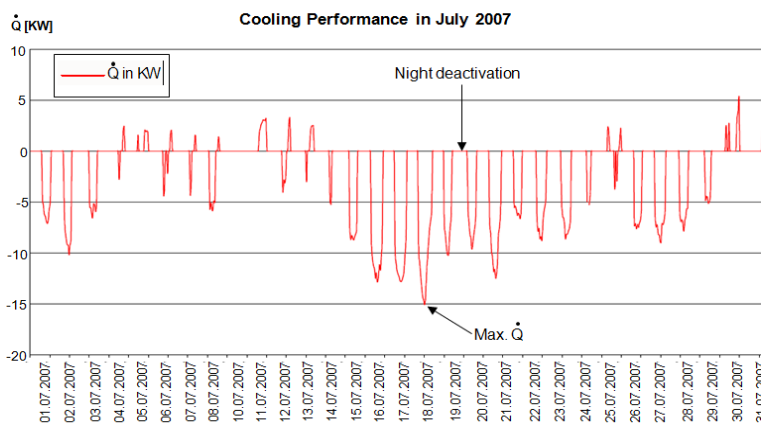
Kuva 26. Lämmöntasaajajärjestelmän lämmitystehoarvot joulukuusta 2007

Kuvassa 26 lämmitystehon nolla-pisteet esittävät yöaikojen tuloksia, siis deaktivoitua, jolloin järjestelmä ei toimi. Lisäksi joulukuussa kaikkein eniten käyttötunteja sääutettiin 503 tuntia. [6]



Kuva 27. Mittaustulokset lämpimältä vuodenajalta

Kuva 27 esittää lämpimän vuodenaajan lämpötilamittausten tuloksia. Mitatut parametrit olivat ilman lämpötila ennen lämmöntasaajaa ja lämmöntasaajan jälkeen, ulkolämpötila, ilman kosteus ennen lämmöntasaajaa ja lämmöntasaajan jälkeen. Ilma on jäähtynyt lämmöntasaajan ansiosta 35 asteesta 18 asteeseen. Eli lämpötilaero (ΔT) on ollut 17 astetta. Lisäksi kostean ilman kondensoitumisen vuoksi 100 %:n suhteellinen kosteus on mitattu pitkän ajanjakson aikana. [6]

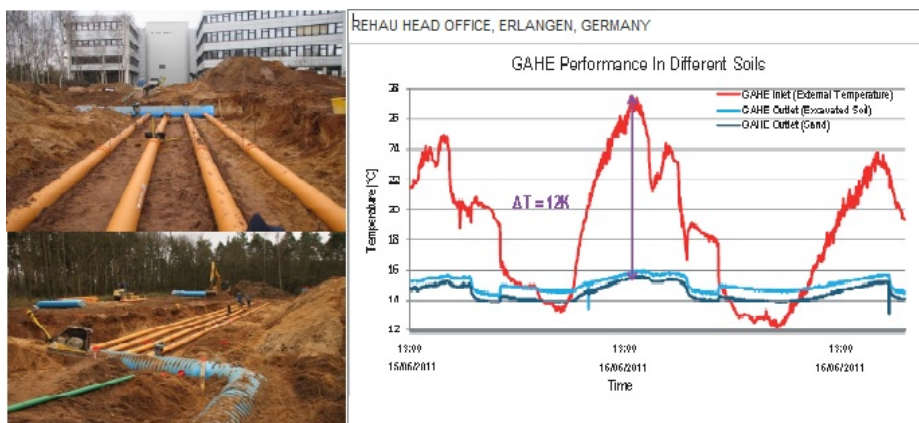


Kuva 28. Lämmöntasaajajärjestelmän jäähdytystehoarvot heinäkuusta 2007

Kuvan 28 mukaan lämmöntasaajajärjestelmän maksimijäähdytystehoksi on laskettu 15 kW. Tarpeeksi viileän ulkoilman lämpötilan vuoksi ohivirtausjärjestelmä on aktivoitunut, joten heinäkuussa käyttötunteja on ollut vain 223 tuntia. [6] Kauppakeskuksen toteutunut vuotuinen energiansäästö lämmityskaudelta oli 26 MWh, kun suunniteltu energiansäästö oli 20,5 MWh. Eli lämmityskustannuksissa on säästetty suunniteltua enemmän. Myös jäähdytyskaudella toteutunut energiansäästö oli 9 MWh, kun suunniteltu

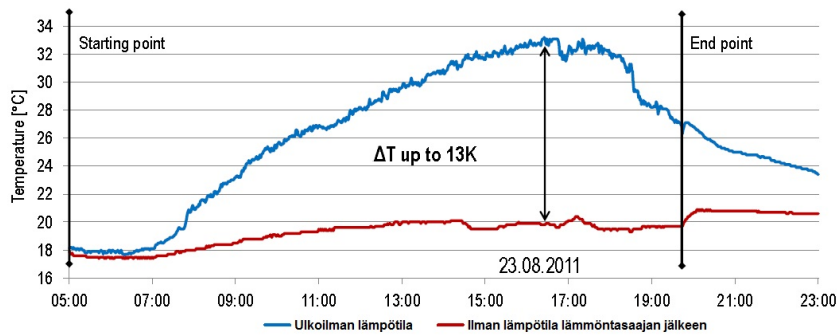
energiansäästö oli 10,7 MWh. Eli todellinen säästetty jäähdytysenergia on jäänyt hiukan alle suunnitellun arvo. [26]

Lämmöntasaaja on tuottanut hyviä tuloksia. Mittaustulosten raportti kertoo, että kokonaisenergiantarve on vähentynyt 30 %, on saavutettu pienempi investointikulutus pienemmän LVI-laitoksen vuoksi ja järjestelmän keskimääräinen takaisinmaksuajaksi on laskettu 8,5 vuotta. [6]



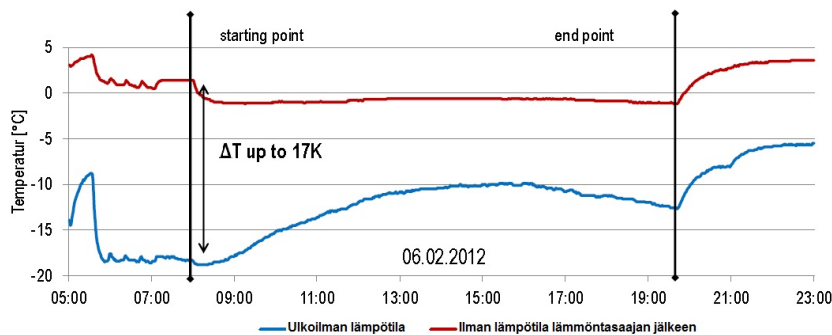
Kuva 29. Asennusvaihe ja mittaustulokset kesäajalta

Rehau Groupin pääkonttorissa Saksan Erlangenissa remontin yhteydessä lämmöntasaa-järjestelmä on asennettu rakennuksen piha-alueella. Maaputkisto on upotettu 4 eri maalajista koostuvan maaperään suorituskyykyyn eri maalajien vaihtelujen mittaamiseksi. Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän ilmapirta vaihtelee 13000 m³/h – 18000 m³/h välillä. Maaputkiston runkokanava koostuu Ø 800 kokoista polyeteenistä valmistetuista putkista. Maaputkiston lämmönsiirto-osuus koostuu 24:sta rivistä, kooltaan Ø 250 ja pituudeltaan 48 m olevista putkista, joiden materiaalina on käytetty antimikrobista polypropeenaa. Kuvassa 29 on esitetty lämmöntasaaajan asennusvaihe ja kahden eri maalajin ulkoilmassa aiheuttamien lämpötilamuutosten vertailu kesäajalta. Kuvan mukaan seurantatiedot osoittavat, että kesällä ulkoilma on jäähtynyt hiekkamaassa 27,5 asteesta 15,5 asteeseen ja kaivetussa maassa 27,5 asteesta 16,5 asteeseen. [27]



Kuva 30. Vuoden lämpimän ajan mittaustulokset

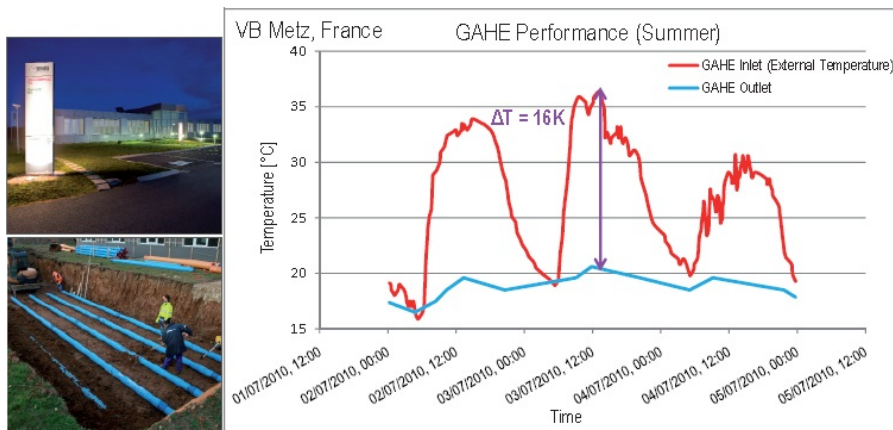
Kuva 30 esittää, että Saksan Erlangenissa vuoden lämpimänä aikana tehtyjen mittausten mukaan ilma on viilentynyt lämmöntasaajan ansiosta 33 asteesta 20 asteeseen. [27]



Kuva 31. Vuoden kylmimmän ajan mittaustulokset

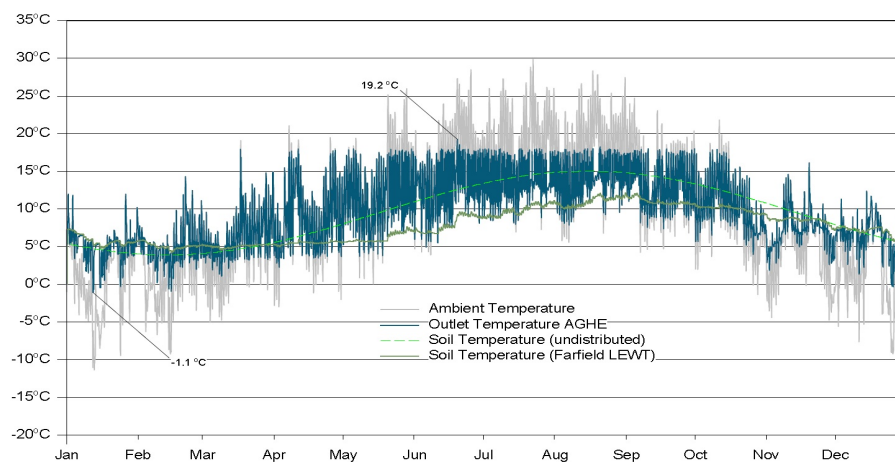
Kuva 31 esittää, että vuoden kylmimpänä aikana tehtyjen mittausten mukaan ilma on lämmennyt lämmöntasaajan ansiosta -18 asteesta -1 asteeseen. Täten lämmöntasaajalla esilämmitetty ilma parantaa LTO-yksikön toimivuutta ja vähentää ilmanvaihtojärjestelmän lämmityskustannuksia. [27]

Lämmöntasaajajärjestelmä on asennettu myös Rehau Groupin Ranskan Metzissä piha-alueelle. Lämmöntasaajajärjestelmän ensisijaisena tavoitteena oli viilentää ilmaa kesällä ja lämmittää vastaavasti talvella. Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirta on 1400 m³/h. Maaputkiston runkokanava koostuu Ø 400 kokoisista polypropeeniputkista. Maaputkiston lämmönsiirto osuus koostuu viidestä rivistä, kooltaan Ø 200 ja pituudeltaan 36 m olevista putkista, joiden materiaalina on käytetty antimikrobista polypropeenä. Maaputkisto on asennettu 1,5 metrin syvyydelle. [28]



Kuva 32. Asennusvaihe ja mittaustulokset kesäajalta

Kuva 32 esittää lämmöntasaajan asennusvaiheen, ja lämpötilan mittaustuloksia kesäajalta. Seurantatiedot osoittavat, että kesän lämpimänä aikana ulkoilma on jäähtynyt 36 asteesta 20 asteeseen. [28]



Kuva 33. Lämmöntasaajajärjestelmän vuotuinen lämpötilaprofiili

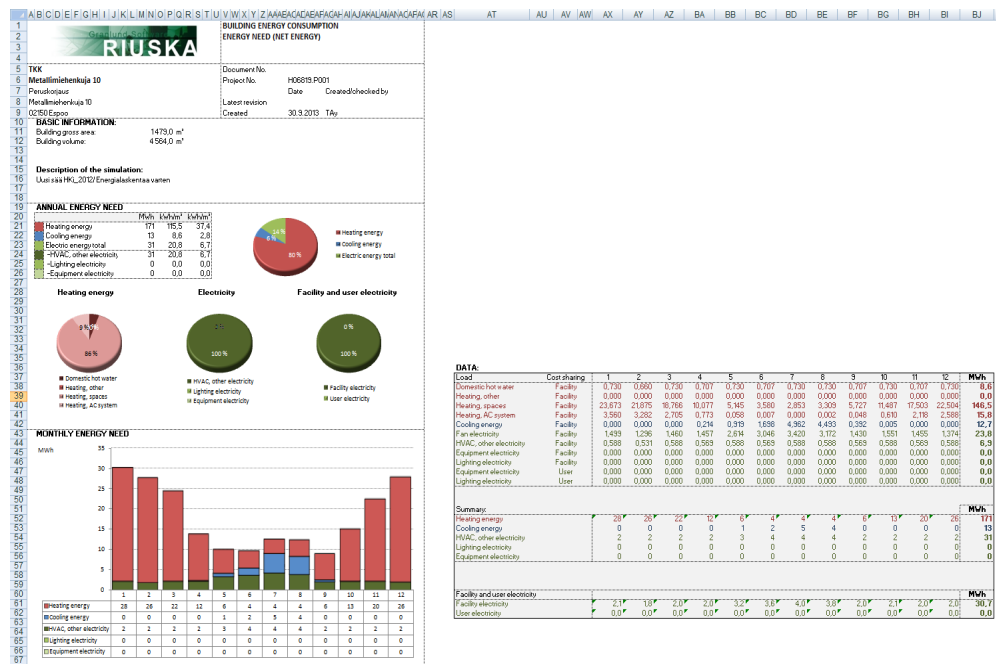
Kuvassa 33 esitetään lämpötilan mittaustuloksia ympäröivästä ulkoilmasta, lämmöntasaajassa virtaavasta ulkoilmasta, häiriintymättömästä maaperästä ja lämmöntasaajaa ympäröivästä maaperästä. Seurantatiedot osoittavat myös, että kesänaikana ulkoilma on jäähtynyt 30 asteesta 18 asteeseen ja maksimi ulostulolämpötila on ollut 19,2 °C kun ulkolämpö oli 29,8 °C. [28]

3. Energianlaskentaympäristöjen kuvaus

3.1. RIUSKA

Riuska on Insinööritoimisto Granlund Oy:n kehittämä olosuhde- ja energiasimulointiohjelma, joka perustuu yhdysvaltalaiseen DOE 2.1E-simulointiohjelmaan. Riuskan avulla voidaan tuottaa sisäilman viihtyvyyteen ja energiankulutukseen liittyviä dynaamisia simulointeja. Simuloinnissa hyväksikäytetään rakennuksen IFC-tiedostomuodossa olevia kolmiulotteisia tietomalleja, joiden avulla voidaan laskea rakennuksen ja sen tilojen lämpötekkinen käyttäytyminen erilaisissa kuormitus- ja sääolosuhteissa. Riuskalla tehdyt simuloinnit perustuvat käyttäjän syöttämiin lähtötietoihin, kuten laitekuormaan, aikataulu- ja rakenneratkaisuihin. [29]

Suunnittelussa Riuskalla voi laskea rakennuksen energiankulutuksen, lämmitystehon ja mitoittaa jäähdytystehon. Riuskalla voidaan simuloida myös sisäolosuhteita sekä kesällä että talvella, jolloin vertaillaan rakennevaihtoehtoja lämmitys- ja jäähdytystehoista ja erilaisista teknisistä järjestelmistä. Riuskalla simuloitaessa voidaan tehdä energiankulutuskalkelmia koko rakennukselle tai määritetyille tietyille tilakokonaisuuksille vuositasolla ja saada tuloksia Excel-pohjaisena tiedostona kuten kuvassa 34 on esitetty. [30]



Kuva 34. Energiasimuloinnin Excelille siirretty tuloste

3.2. Dynaaminen laskentatyökalu

Tässä diplomityössä teoreettista tutkintoa varten luotiin dynaaminen laskentatyökalu, jonka toiminta perustuu Microsoft Excelissä yhtälöiden laskemiseen sekä Visual Basic-ohjelmiston laskentaprosessien valvomiseen. Laskentatyökalun kirjastosta löytyy lähtötietoina uusimman testivuoden TRY2012 tunneittain ulkoilman lämpötila-arvot, suhteelliset kosteusarvot, tuulen nopeus- ja suuntatiedot, sekä vaakapinnalle osuvat kokonaissäteilyarvot. Laskentatyökalun kirjastoon on lisätty myös Ilmatieteenlaitoksen ilmoittamat keskimääräiset kuukausittaiset lumensyvyysarvot vuosilta 1981 - 2010.

Laskentatyökaluun on syötetty myös esimerkkikohteen aiemmat RIUSKA:lla määritelty tunnitaiset ilmavirrat ja markkinoilla olevien lämmönsiirtoputkien koot, jotka voidaan valita käyttöliittymässä luetteloruudulla lähtötietojen määrittämisessä. Laskelmissa otetaan huomioon myös maalajien termiset ominaisuudet ja tiheydet, jotka on kerätty kirjastoon useista tieteellisistä lähteistä. Termisistä ominaisuuksista esillä on mm. lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja terminen diffusiviteetti.

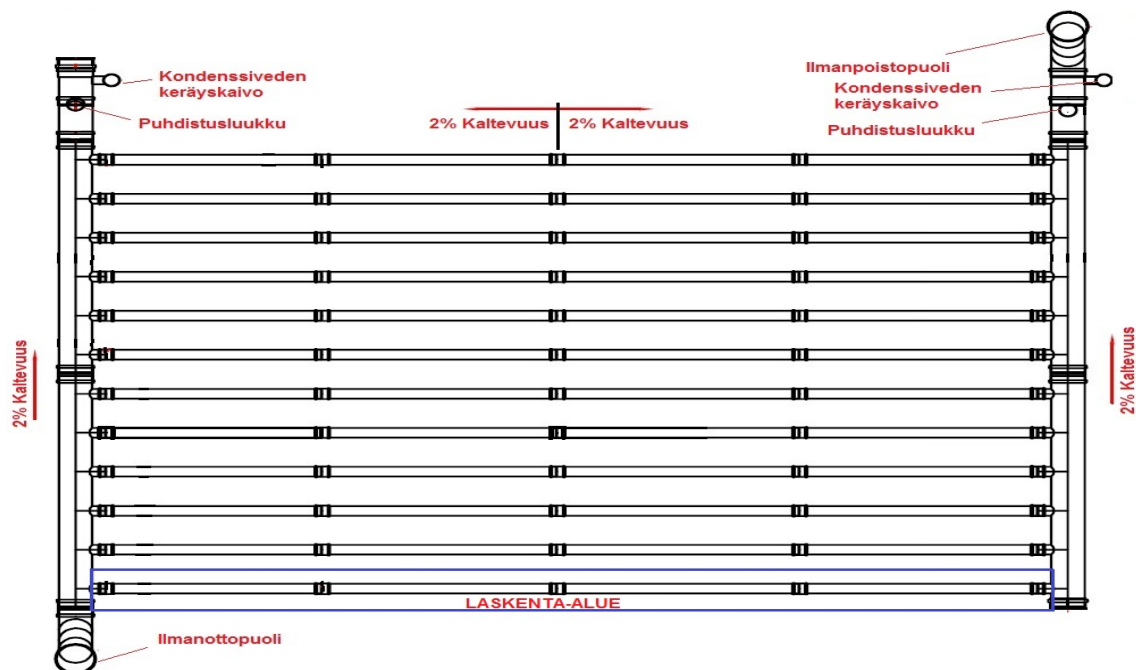
Tässä diplomityössä tutkittiin myös maanpinnalla tapahtuvaa säteilyilmiötä, jota varten kerättiin eri maanpeitteiden albedot ja pitkäaaltoiset emissiokertoimet. Niitä lisättiin laskentatyökalun kirjastoon, jotta käyttöliittymässä voi valita taas luetteloruudun avulla lähtötietojen määrittämisessä.

Diplomityössä otetaan huomioon myös lämmöntasajajärjestelmää ympäröivän maan pintatyypin, koska se vaikuttaa tunneittain häiriintymättömän maan lämpötilaprofiiliin. Täten ympäröivän maan pintatyypin jaetaan neljään eri ryhmään: metsä, nurmikko, asfaltti ja rakennus, joiden maanpinnan keskimääräiset lämpötilat vaihtelevat toisistaan. Tätä varten neljän ryhmän pintalämpötilat ovat lisätty myös kirjastoon, jotka voidaan valita käyttöliittymästä luetteloruudulla maanlämpötilaprofiilin määrittämisessä. Maanpintatyypin lisäksi maanpinnan karheus vaikuttaa konvektion kautta maanpinnan ja ulkoilman väliseen energiataseeseen. Maanpinnan karheus jaetaan erittäin tasaisesta erittäin karheaan kuuteen eri ryhmään ja kuhunkin ryhmään kuuluvat karheuskertoimet on lisätty kirjastoon, jotta ne voidaan lisätä laskentaan luetteloruudun avulla.

3.2.1. Laskentatyökalun toimintaperiaate

Laskentatyökalun toimintaperiaate perustuu ulkoilman, maaperän, lämmönsiirtoputken ja sen sisällä virtaavan ilman välillä tapahtuvan lämmön siirtymiseen. Lämmön siirtyminen on lähtökohtaisesti dynaaminen eli ajan mukana muuttuva ilmiö. Koska lämpötilat ja lämpövirrat muuttuvat jatkuvasti ulkoilman lämpötilan, tuulen virtausnopeuksien ja -suuntien, auringon säteilyn, kosteusarvojen, lumensyvyyksien ja maaperän lämpötilan vaihdellessa. Dynaamisessa laskennassa myös maaperän sekä putken varaama ja luovuttama lämpöenergia on otettava huomioon. Tässä diplomityössä meitä kiinnostaa enemmän suurkohteita palveleva lämmöntasaajajärjestelmä. Siksi panostetaan enemmän haaroitettuun asennukseen. Kuvassa 35 esitetään haaroitettu asennuksen perus periaatekuvaa. Toisaalta luotu dynaaminen laskentatyökalu pystyy tutkimaan myös rengasasennuksena rakennetun lämmöntasaajajärjestelmän.

Tässä diplomityössä ensimmäisenä oletuksena on, että mallinnetaan vain ulommainen lämmönsiirtoputki, sen ympärillä oleva maaperä ja maaperän kanssa kosketuksessa oleva ulkoilma. Laskentatyökalussa tutkitaan ainoastaan ulommaista lämmönsiirtoputkea, koska halutaan vähentää laskentayhtälöitä, Excel tiedoston kokoa ja lyhentää laskenta-aikoja. Kuitenkin jakoputkissa tapahtuva lämmönsiirto on pienempi verrattuna lämmönsiirtoputkessa tapahtuva lämmönsiirtoon.

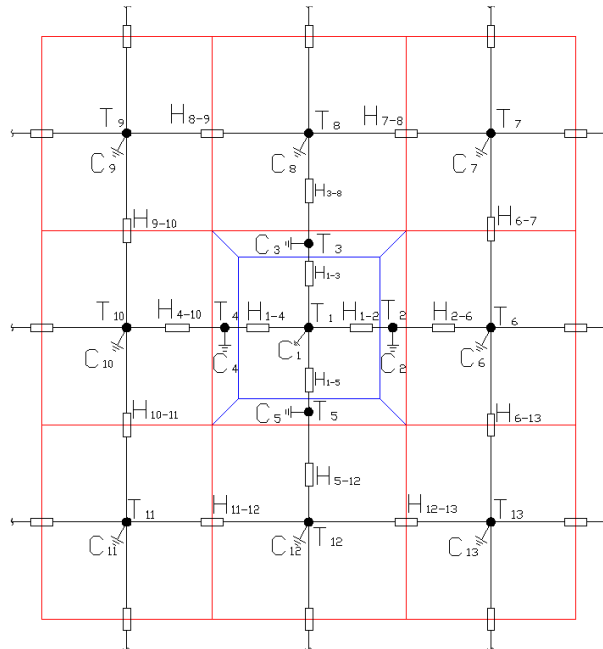


Kuva 35. Haaroitetun asennuksen perusperiaatekuva

Dynaamista laskentaa varten lämmönsiirtoputki ja sitä ympäröivä maaperä jaetaan 20 vastaaviin paloihin, jotta voidaan laskea jaetuissa paloissa tapahtuvan lämmönsiirto virtaussuunnassa. Lisäksi jokainen pala jaetaan putken radiaalisuunnassa yhteensä 74 vastaavaan soluun.

Maankamaraa mallinnetaan syvyys suunnassa ainakin niin paljon, että saavutetaan syvyysulottuvuus, mistä lähtien maankamaran lämpötila on vuodenajasta riippumaton ja lämpötila on pintalämpötilan vaihtelun keskiarvo. Toisaalta maankamaran mallintaminen syvemmälle tuottaa todellisen mukaisempia laskentatuloksia, koska laskentamalli on dynaaminen eli maankamaran lämpötilat eivät ole stationäärisiä ja syvyys suunnassa tapahtuvan lämmönsiirron laskemiseen tarvitaan riittävän syvä laskentamalli.

Laskentamallin helpottamiseksi toisena oletuksena putken muoto vaihdetaan neliöksi, jonka ulko- ja sisämitat ovat yhtä suuri kuin putken ulko- ja sisäkehät. Muodon vaihtamisen syynä on, että halutaan helpottaa solmujen lämpökapasiteettien ja konduktanssien laskentaa.



Kuva 36. Laskentamallin periaatekuva

Laskentamallin jokaisen solmun keskipisteelle määritetään lämpötilapisteet, lämpökapasiteetit ja lämpökonduktanssit, jotka yhdistävät lämpötilapisteitä toisiinsa. Kuvassa 36 esitetään laskentamallin perus periaatekuva lämmönsiirtoputkesta ja sitä ympäröivästä

maaperästä. Laskentatyökalu ei ainoastaan laske vaaka- ja pystysuunnassa olevaa lämmön siirtymistä, laskee myös virtaussuunnassa olevaa lämmön siirtymistä. Tätä varten solmupisteiden välillä olevia lämpökonduktanssia määritetään myös virtaussuunnassa, jotta laskentatyökalulla voidaan tutkia lämmönsiirtymistä kolmeulotteisesti. Lämpökonduktanssia lasketaan lämpövastusten avulla, mikä lasketaan seuraavasti [37]:

$$\mathbf{R}_{1-2} = \frac{\Delta x/2}{kA} + \frac{1}{\alpha_p A} \quad (5)$$

missä R on putken ja sen sisällä virtaavan ilman välinen lämpövastus [K/W], Δx [m] on lämmönsiirtoputken paksuuden puolet, k [W/mK] on lämmönsiirtoputken keskimääräinen lämmönjohtavuus, A [m²] on lämmönsiirtoa kohtisuorassa oleva putken pinta-ala ja α_p [W/m²K] on putken sisällä virtaavan ilman konvektiokerroin. Lämpökonduktanssi [W/K] on lämpövastuksen käänteisarvo ja sitä lasketaan jokaiselle solmupisteelle seuraavasti [37]:

$$\mathbf{H}_{1-2} = 1/\mathbf{R}_{1-2} \quad (6)$$

Vastaavasti lämpökapasiteettia lasketaan jokaiselle solmupisteelle. Lämpötilapisteeseen T_1 liitetty lämpökapasiteetti lasketaan seuraavasti [37]:

$$\mathbf{C}_1 = A\Delta x\rho c \quad (7)$$

missä C on lämpökapasiteetti [J/K], $A\Delta x$ on tilavuus [m³], ρ on tiheys [kg/m³] ja c on ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]. Nyt voidaan kirjoittaa putken sisällä virtaavalle ilmalle energiatase (lämpötase) seuraavasti [37]:

$$\mathbf{C}_1 \frac{dT_1}{dt} = \mathbf{H}_{1-2}(T_2 - T_1) + \mathbf{H}_{1-3}(T_3 - T_1) + \mathbf{H}_{1-4}(T_4 - T_1) + \mathbf{H}_{1-5}(T_5 - T_1) + \mathbf{H}_{1-1}(T_{1(i-1)} - T_1) + \mathbf{H}_{1-1}(T_{1(i+1)} - T_1) \quad (8)$$

missä H_{1-1} on putken sisällä virtaavan ilman virtaussuunnassa oleva lämpökonduktanssi [W/K], $T_{1(i-1)}$ on edellisessä palassa virtaavan ilman lämpötila [°C tai °K] ja $T_{1(i+1)}$ on jälkimmäisessä palassa virtaavan ilman lämpötila [°C tai °K]. Tällöin voidaan muodostaa jokaiselle solmupisteelle kolmeulotteinen lämpötase. Yhtälön (8) vasen puoli edustaa ilman massan varastoimaa ja luovuttamaa lämpötehoa ja oikea puoli edustaa ilmaan tulevia tai siitä lähteviä lämpövirtoja. Lämpövirtojen summa antaa meille jokaisella ajanhetkellä ilmaan varastoituneen lämpötehon tai sen luovuttaman lämpötehon. Diffe-

rentiaaliyhtälöä (8) halutaan soveltaa differenssimenetelmiin, jolloin voidaan kirjoittaa derivaattatermin tilalle differenssitermi seuraavasti [37]:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{T_1 - T_{1-1}}{\Delta t} \quad (9)$$

missä T_1 on ilman lämpötila nykyisellä ajanhetkellä, T_{1-1} on ilman lämpötila edellisellä ajanhetkellä ja Δt on kahden ajanhetken välinen aika-askel [s]. Ratkaisemalla nykyisen ajanhetken lämpötila saadaan [37],

$$T_1 = T_{1-1} + \left| \frac{dT_1}{dt} \right|_n \Delta t \quad (10)$$

missä yhtälön (8) esittämä derivaatta voidaan valita vastaamaan erilaisia ajanhetkiä, edellistä, nykyistä, tai niiden yhdistelmää, jolloin saadaan erilaisia laskentamenetelmän variaatioita. Kun sijoitetaan nykyistä ajanhetkeä vastaava derivaatta yhtälöön (10), saadaan [37]:

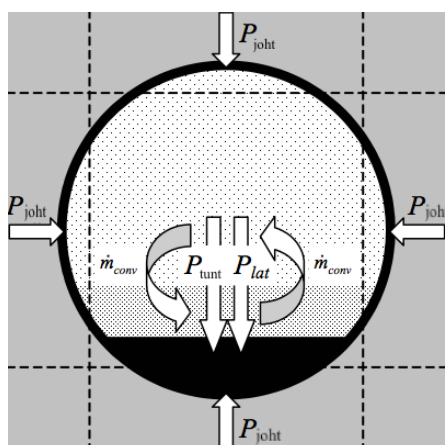
$$T_1 = T_{1-1} + \frac{\Delta t}{C_1} [H_{1-2}(T_{2,(t-1)} - T_1) + H_{1-3}(T_{3,(t-1)} - T_1) + H_{1-4}(T_{4,(t-1)} - T_1) + H_{1-5}(T_{5,(t-1)} - T_1) + H_{1-1}(T_{1,(t-1)(i+1)} - T_1)] \quad (11)$$

Yhtälössä (11) ”t-1” merkityt ovat edellisen ajanhetken lämpötilat. Tästä yhtälöstä voidaan edelleen ratkaista nykyistä ajanhetkeä vastaava lämpötila kun tunnetaan edellisen ajanhetken lämpötilat [37]

$$T_1 = \frac{T_{1-1} + \frac{\Delta t}{C_1} [H_{1-2}T_{2,(t-1)} + H_{1-3}T_{3,(t-1)} + H_{1-4}T_{4,(t-1)} + H_{1-5}T_{5,(t-1)} + H_{1-1}T_{1,(t-1)(i+1)}]}{1 + \frac{\Delta t}{C_1} [H_{1-2} + H_{1-3} + H_{1-4} + H_{1-5} + H_{1-1}]} \quad (12)$$

Differenssimenetelmää voidaan soveltaa jokaiselle solmupisteelle, jolloin lasketaan lämpötilapisteiden vaikutusta toisilleen määritetyllä aika-askelilla. Mitä lyhyempiä aika-askeleita käytetään, sitä parempia ja realistisempia tuloksia saadaan. Toisaalta aika-askeleiden lyhentäminen suurentaa laskentamääriä ja täten pidentää laskenta-aikoja, joten on oltava tarkkana aika-askelin määrittämisessä. Tällä laskentatyökalulla on kehitetty erilaisia aika-askeleita optimipituutta etsiessä ja tulosten mukaan 15 minuuttia lyhyempien aika-askeleiden käyttö ei enää vaikuttanut tuloksiin merkittävästi. Joten aika-askeleksi on käytetty 15 minuuttia. Laskentatyökalu siis laskee lämpötilapisteiden välistä lämmönsiirtymistä energiataseyhtälöillä neljästi tunnissa ja jokaisen tunnin lopussa vaihtaa muuttujia kuten ulkolämpötilaa, tuulen nopeutta, vaakapinnalle osuvaa kokonaissäteilyä, suhteellista kosteutta jne. Visual Basicilla laadittu ohjelma ohjaa laskenta-askeleita ja tallentaa lopullisia tuloksia, kuten lämmöntasaajan jälkeen saavutetut

lämpötilat, absoluuttiset kosteudet, järjestelmällä säästetyt lämmitys- ja jäähdytysenergiat. Tulosten avulla voidaan vertailla lämmöntasaajan eri rakennevaihtoehtoja.



Kuva 37. Putken ja ilman välinen energia- ja massatase

Kaavalla (12) voidaan laskea maaperän, putken ja ilman välinen lämmönsiirto, joka koostuu vain johtumisesta ja konvektiosta. Näiden lisäksi laskentaan on lisättävä latenttilämmön eli piiloutuvan lämmön vaikutus. Kuvassa 37 on yksinkertainen esitys latenttilämmön vaikutuksesta. Lämmönsiirtoputken sisäpinnan ja ilman välillä tapahtuvalla latenttilämmönsiirrolla tarkoitetaan ainoastaan kosteuden tiivistymisen aikana tapahtuvaa lämmönsiirtoa, jossa ei oteta huomioon haihtumisen aikana tapahtuvaa latenttilämmönsiirtoa. Tämän oletuksen syynä on se, että tiivistynyt vesi ei jää seisomaan putkistossa sen kaltevuuden takia ja se poistuu maaputkistoon liitetyn kondenssivedenpoistojärjestelmän kautta. Tällöin laskelmissa ei tarvitse huomioida haihtuvan veden vaikutusta.

3.2.2. Laskentaan vaikuttavat tekijät

Dynaamisen laskentatyökalun toiminta perustuu tunneittain muuttuvien tekijöiden lämpödynaamisen vaikutuksen laskemiseen. Muuttuvien tekijöiden lisäksi joidenkin muuttujien oletetaan olevan muuttumattomia, kuten esimerkiksi ulkoilman ominaisuuksista tiheys, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, Prandtin luku ja kinemaattinen viskositeetti. Tätä varten koko vuodelle laskettiin keskimääräinen arvo ulkoilman lämpötiloista ja sitä käytettiin ilman keskimääräisten ominaisuuksien löytämisessä. Maaperän lämpöteknisistä ominaisuuksista myös lämmönjohtavuuden oletettiin pysyvän muuttumattomana, koska kosteudenpitoisuus vaikuttaa siihen merkittävästi ja maaperän tunnitista kosteuspitoisuutta on hyvin vaikea tietää. Täten kerättiin tilastollisia arvoja

tieteellisistä artikkeleista ja tutkimuksista. Laskentatyökalussa käytetyt tunneittain muuttuvat tekijät ovat mm. Ilmavirrat, tuulen nopeus, ulkoilman suhteellinen kosteus ja lämpötila, ulkoilmavirta, lumensyvyyydet ja vaakapinnalle osuva kokonaissäteily. Näiden arvojen muuttuessa lämmönsiirto syntyy maan, ulkoilman, lämmönsiirtoputken ja sen sisällä virtaavan ilman välillä.

3.2.2.1. Ilmavirran vaikutus

Lämmöntasaajajärjestelmän suunnittelussa ilmavirralla on suuri vaikutus laskentaan. Lämmönsiirtoputkien koon ja määrän valinta tehdään ilmavirran nopeuden perusteella ja oikean määrän ja koon valinta vaikuttaa järjestelmän tehokkuuteen merkittävästi. Aikaisemmin tehtyjen tutkimusten mukaan lämmönsiirtoputken sisällä virtaavan ilman nopeus ei saisi ylittää 3 m/s ja jakoputken sisällä virtaavan ilman nopeus 6 m/s, jotta järjestelmän energiantehokkuus pysyisi mahdollisimman hyvänä ja välttäisi meluhaitat. Suositellun rajan ylimenevät ilman nopeudet aiheuttavat korkeita painehäviöitä, jolloin käyttökustannukset kasvavat. Lämmönsiirtoputken suositeltu optimi painehäviö on alle 30 Pa. [36] Toisaalta ilmavirran nopeuden liian alhaisena pitäminen kasvattaa putkimääriä, joten on hyvä miettiä myös investointikustannuksia heti suunnittelun alussa. Lämmönsiirtoputkena on valittava Ø 200 tai Ø 250 tai Ø 315 jos on riittävän kokoinen rakennuspaikka, jotta saadaan parhaan lämmönsiirtohyötyä. Lämmönsiirtoputkien määrän ja koon valinnalla on merkittävä vaikutus ilman virtaustekniseen käyttäytymiseen, jonka perusteella voidaan ennustaa virtaustyyppi. Täten tarvitaan tietää virtausnopeus, joka lasketaan seuraavalla kaavalla [33]:

$$U = \frac{V'}{A_D n} \quad (13)$$

missä U on virtausnopeus [m/s], V' on ilman tilavuusvirta ajanhetkellä [m³/s], A_D on putken virtaussuuntainen poikkipinta-ala [m²] ja n on lämmönsiirtoputkien määrä. Virtaustyyppin määrittämiseen tarvitaan tietää dimensioton Reynoldsin luku, jonka lasketaan seuraavasti [33]:

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (14)$$

missä Re on Reynoldsin luku, U on virtausnopeus [m/s], D on lämmönsiirtoputken sisähalkaisija [m] ja ν on ilman kinemaattinen viskositeetti [m²/s]. Ilman virtausteknisellä käyttäytymisellä on tärkeä osa lämmön siirtymisessä. Turbulentti virtaus aiheuttaa put-

ken sisäpinnalle ohuemman kalvon kuin laminaarinen virtaus, joka mahdollistaa suuremman lämpövirran. Ilman virtaustekninen käyttäytymisen voidaan tulkita Reynoldsin luvun avulla. Jos Reynoldsin luku on alle 2300, kyseessä on laminaarinen virtaus. Jos Reynoldsin luku on 2300–4000, virtaus on siirtymäalueella, jolloin ilmavirtaus voi olla laminaarinen tai turbulenttinen tai vaihdella näiden välillä. Jos Reynoldsin luku on yli 4000, virtaus on turbulenttinen. Siirtymäalueella virtaustyyppin määrittäminen on vaikeaa, joten voidaan olettaa virtaus täysin turbulentiksi vasta, kun Re on 10000. Siis kun Re on 2300–10000, virtaus on siirtymäalueella. [38] Konvektiokertoimen löytämiseen vielä tarvitaan dimensioton Nusseltin luku, jonka lasketaan erilaisilla yhtälöillä virtaustyyppin mukaisesti. Laminaarisessa virtauksessa Nusseltin luku lasketaan näin [33]:

$$Nu_D = 3,66 + \frac{0,065(D/L)RePr}{1+0,04[(D/L)RePr]^{2/3}} \quad (15)$$

missä L on putken pituus [m] ja Pr on dimensioton Prandtin luku. Myös laminaarisen virtauksen dimensioton kitkakerroin saadaan kaavasta [11]:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

Jos Reynoldsin luku on siirtymäalueella, Nusseltin luku riippuu Reynoldsin luvusta, Prandtin luvusta ja kitkakertoimesta [33]:

$$Nu_D = \frac{(\lambda/8)(Re-1000)Pr}{1+12,7(\lambda/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (17)$$

Siirtymäalueella kitkakerroin saadaan kaavasta [11]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \log \left[\frac{k_a/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right] \quad (18)$$

missä k_a on putken karheus [m] ja D on putken sisähalkaisija [m]. Putkien karheusarvot vaihtelevat toisistaan merkittävästi, kuten ne ovat esitetty taulukossa 3. Kaavalla (18) kitkakertoimen laskemiseen tarvitaan iterointia.

Taulukko 3. Eräiden putkien karheuksia (mm)

	k_a (mm)		k_a (mm)
PVC- ja muoviputket	0,0015..0,007	Valurautaputki	0,4..0,6
Teräsputki	0,045	Bitumoitunut valurautaputki	0,125
Sinkitty teräsputki	0,15	Joustava putki	0,6..0,8

Jos kyseessä on turbulenttinen virtaus, Nusseltin luku voidaan laskea tällä kaavalla [33]:

$$\text{Nu}_D = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^n \quad (19)$$

missä $n=0,4$ kun kyseessä on ilman lämpeneminen ja $n=0,3$ kun kyseessä on ilman jäähtyminen. Kitkakerroin saadaan turbulentissa virtauksessa kaavasta [11]:

$$\lambda = 0,25 \left[\log \left[\frac{k_a/D}{3,7} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right] \right]^{-2} \quad (20)$$

Tässä diplomityössä suunniteltu laskentatyökalu seuraa ilman tunneittain vaihtelevia tilavuusvirtoja ja laskee jokaiselle tunnille nopeusarvot valitun putkikoon mukaan. Laskentatyökalu ymmärtää Reynoldsin luvun avulla virtaustyyppin ja laskee virtaustyyppin mukaisesti Nusseltin luvun. Lopuksi se löytää lämmönsiirtoputken sisällä virtaavan ilman konvektiokertoimen [$\text{W/m}^2\text{K}$] seuraavasti:

$$\alpha_p = \frac{\text{Nu}_D k}{D} \quad (21)$$

missä k on ilman lämmönjohtavuus, jonka oletetaan vakiona [$0,0246 \text{ W/mK}$]. Näin ollen syöttämällä konvektiokertoimen kaavoihin (5,6), saadaan laskettua lämpökonduktanssi.

Lämmöntasaajajärjestelmän putkissa aiheutuvalla painehäviöllä on merkittävä vaikutus energiatehokkuuteen, joten lämmöntasaajan suunnittelussa on tärkeä valita putkien määrän ja koon lisäksi oikeanlaiset putkiliitännät. Ilmavirran aiheuttama kokonaispainehäviö jakaantuu kitkallisen virtauksen aiheuttamaan painehäviöön ja paikallisvastusten aiheuttamaan painehäviöön. Kitkahäviöt syntyvät putkistossa ilman sisäisestä kitkasta eli viskositeetista sekä kanavan sisäpuolisen seinämän ja ilman välisestä kitkasta. Kitkavastukset ovat suoraan verrannollisia putken pituuteen, halkaisijaan, laminaarisessa virtauksessa virtausnopeuteen ja turbulenttisessa virtauksessa dynaamiseen paineeseen. Kitkavastusten aiheuttama painehäviö [Pa] voidaan laskea seuraavasti [39]:

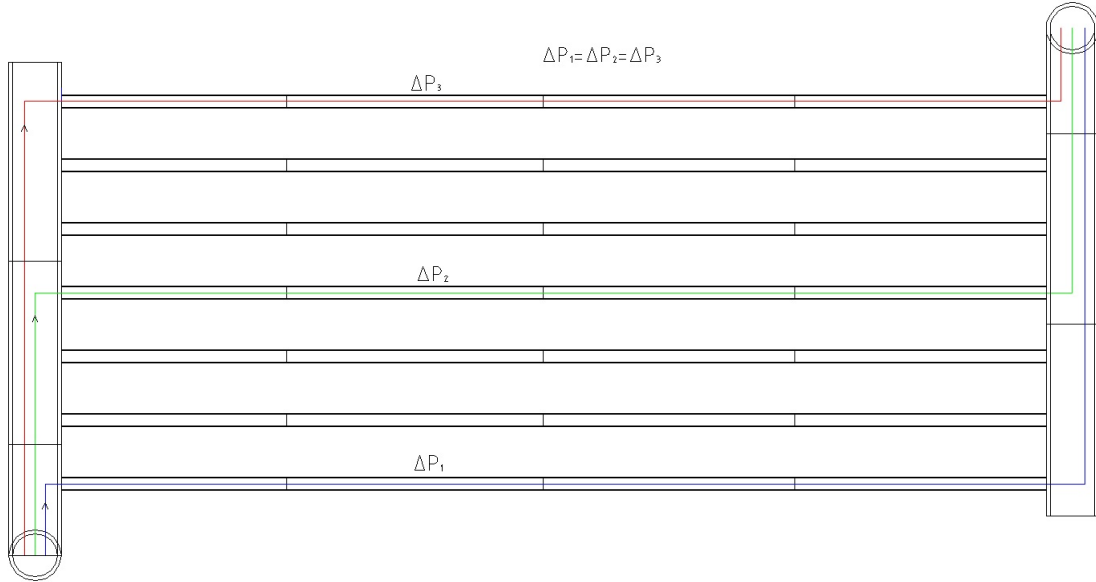
$$\Delta P_k = \frac{\lambda L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (22)$$

missä ρ on ilman tiheys [kg/m^3], L on putkipituus [m] ja U on virtausnopeus [m/s]. Putkistossa olevat putkikäyrät, T-kappaleet, supistukset, laajennukset jne. aiheuttavat painehäviöitä, joka on verrannollinen putkistoon liitettyjen osien paikallisvastuskertoimien summasta. Paikallisvastusten aiheuttama painehäviö lasketaan kaavalla [39]:

$$\Delta P_p = \xi \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (23)$$

missä ξ on kertavastuskertoimien summa. Putkistossa oleva kokonaispainehäviö lasketaan summaamalla kitkallisen virtauksen aiheuttamat painehäviöt ja paikallisvastusten aiheuttamat painehäviöt, kaavalla [39]:

$$\Delta P = \left(\frac{\lambda L}{D} + \xi \right) \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (24)$$



Kuva 38. Haaroitetun asennuksen painehäviöiden laskenta, kaikessa reitissä on saman verran painehäviöitä

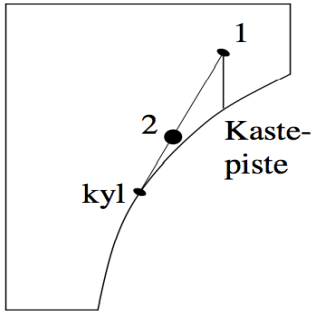
Lämmöntasaajajärjestelmän haaroitetussa asennuksessa saadaan laskettua kaikille reiteille saman verran painehäviöitä, joiden ansiosta ilmavirta jakaantuu tasaisesti kaikkiin lämmönsiirtoputkiin. Painehäviölaskennassa vain yhden reitin painehäviöiden laskeminen antaa meille järjestelmän kokonaispainehäviön. Kokonaispaineen nousun aiheuttama puhallinenergian lisäys lasketaan kaavalla [10]:

$$Q_P = V' \Delta P t \quad (25)$$

missä Q_P on puhallinenergian lisäys [J], V' on tilavuusvirta [m^3/s], ΔP on painehäviö [Pa] ja t on käytetty tuntimäärä [s].

Lämmönsiirtoputkessa kostean ilman ja putken sisäpintojen välillä tapahtuu konvektion lisäksi latenttilämmönsiirtoa kosteuden tiivistymisestä johtuen. Samanaikaisesti ilman sisältävä kosteuspitoisuus vähenee ja luovuttaa latenttilämpöä sisäpinnoille. Jos halutaan selittää jäähtymisprosessi Mollieri-piirroksessa, kuten kuvassa 39 on esitetty, ilma jäähtyy alkulämpötilasta (T_1) loppulämpötilaan (T_2) ja absoluuttinen kosteus pienenee tiivistymisestä johtuen, mikäli putken sisäpintojen lämpötila on pienempi kuin ilman

kastepistelämpötila. Prosessin suunta on aina kohti pintalämpötilaa vastaavaa kyllästymiskäyrän pistettä (kyl). [5]



Kuva 39. Jäähtymisprosessi Mollier piirroksessa

Ilman jäähtyessä tapahtuva kosteuden muutoksen seuraaminen on tärkeä laskentatyökalussa sen takia, että tarvitsemme tietää ilman lopputilanteen absoluuttisen kosteuden, jotta voimme laskea entalpiamuutoksen jäähtymisenergian laskemiseksi.

Dynaaminen laskentatyökalu jakaa lämmönsiirtoputken virtaussuunnassa 20 vastaavaan palaan, jossa jokaisessa tutkitaan erikseen massan- ja energiansiirtyminen. Koska kaikissa ei tapahdu saman verran energian- ja massansiirtymistä. Ilman putken sisäpinnalle luovuttama konvektio eli tuntuva lämpöteho [W] lasketaan tällä kaavalla:

$$P_{tunt} = S_{tub} \alpha_p (T_{ilma} - T_{tub}) \quad (26)$$

missä T_{ilma} on ilman lämpötila putkipalassa [°C], T_{tub} on putkipalan sisäpinnan lämpötila [°C] ja S_{tub} on putkipalan sisäpinta-ala [m²], johon lämmönsiirto on kohdistunut. Lewisin lähestymistapa harkitsee, että putken sisäpinnan ja ilman välinen tuntuva lämmönsiirto on yhtä suuri kuin putken sisäpinnalla kosteudessa kyllästyneen pinnallisen kerroksen ja ilmavirran välillä tapahtuva massasiirron aiheuttama lämmönsiirto. Lämmön- ja massansiirron välinen yhtäläisyys antaa meille siirtyneen ilman konvektiivisen massavirran [kg/s] seuraavasti [40][33]:

$$\dot{m}_{ilma} = \frac{P_{tunt}}{c_{ilma}(T_{ilma} - T_{tub})} = \frac{S_{tub} \alpha_p}{c_{ilma}} \quad (27)$$

missä c_{ilma} on ilman ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]. Ilman konvektiivisen massavirran sekä kyllästyneen kerroksen ja ilman absoluuttisten kosteuksien välinen eron avulla lasketaan lopuksi kosteuden siirtymä [kg/s] tällä kaavalla [40][33]:

$$\dot{m}_{lat} = (x_{ilma} - x_{tub}) \dot{m}_{ilma} \quad (28)$$

missä x_{ilma} on ilman absoluuttinen kosteus putkipalassa [kg/kg] ja x_{tub} on kyllästyneen pinnallisen kerroksen absoluuttinen kosteus [kg/kg]. Absoluuttiset kosteudet lasketaan näillä kaavoilla [40][33]:

$$x_{ilma} = \frac{RHP_{kyl}(T_{ilma})M_{vesi}}{P_{ilma}M_{ilma}} \quad (29)$$

$$x_{tub} = \frac{100\%xP_{kyl}(T_{tub})M_{vesi}}{P_{ilma}M_{ilma}} \quad (30)$$

missä RH on ilman suhteellinen kosteus, $P_{kyl}(T_{ilma})$ on ilman kylläisen höyrynpaine [Pa], $P_{kyl}(T_{tub})$ on kyllästyneen pinnallisen kerroksen kylläisen höyryn paine [Pa], M_{vesi} on veden moolimassa [kg/mol], M_{ilma} on ilman moolimassa [kg/mol] ja P_{ilma} on ilman kokonaipaine [Pa]. Mikäli m_{lat} on negatiivinen, kyseessä on haihtuminen ja vastaavasti mikäli m_{lat} on positiivinen, kyseessä on tiivistyminen. Kylläisen höyryn paine lämpötilan funktiona voidaan ilmaista seuraavalla yhtälöllä [13]:

$$P_{kyl}(T) = \frac{\exp\left(77,345 + 0,0057T - \frac{7235}{T}\right)}{T^{8,2}} \quad (31)$$

Lopuksi voidaan laskea putkipalassa tapahtunut latenttilämpötehoa [W] seuraavasti[40]:

$$P_{lat} = c_{lat}m_{lat} \quad (32)$$

missä c_{lat} on veden latenttilämpö (ominaishöyrystymislämpö / ominaistiivistymislämpö) [J/kg]. Ilman sisältävä kosteuden tiivistyessä, ilma luovuttaa latenttilämpönsä kosketuksessa olevaan pintaan. Täten latenttilämpöteho on lisättävä virtaavan ilman kanssa kosketuksessa olevien solujen energiantaseyhtälöihin, jotta voidaan huomioida myös faasisimuutoksen aiheuttama lämpenemisen putkessa sekä maaperässä. Tiivistymisestä johutuva lämpö on tutkittava tarkasti, koska kyseessä on suuri määrä lämpöenergia, joka siirtyy tiivistyvistä ilmasta maahan. Veden ominaistiivistymislämpö c_{lat} normaalipaineessa on noin 2260 kJ/kg. Tämä tarkoittaa viisikertainen energiamäärä, joka tarvitaan veden lämmittämiseen 0 °C lämpötilasta 100 °C lämpötilaan. Ilman lopullisen absoluuttisen kosteuden laskemista varten, on laskettava jokaisessa putkipalassa tapahtuvaa kosteudensiirtoa tällä kaavalla [41]:

$$x_{ilma,i} = x_{ilma,i-1} - \frac{m_{lat}}{m_p} \quad (33)$$

missä m_p on yhdessä putkissa virtaavan ilman massavirta [kg/s], ”i-1” merkitsee edellisen solun askelnumero ja ”i” merkitsee seuraavan solun askelnumero. Kun tämä yhtälö on ratkaistu kaikilta osiin, saadaan laskettua lopullinen absoluuttinen kosteus. Energia-

taseyhtälöllä (12) voidaan laskea ilman viimeisen solun jälkeen oleva lämpötila ja kaavalla (33) absoluuttinen kosteus, jotta voidaan määrittää entalpia [kJ/kg] [13]:

$$\mathbf{h} = \mathbf{c}_{pi}\mathbf{T} + \mathbf{x}(\mathbf{l}_{h,0} + \mathbf{c}_{ph}\mathbf{T}) \quad (34)$$

missä c_{pi} [kJ/kg°C] on kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti, $l_{h,0}$ on veden höyrystymislämpö lämpötilassa 0 °C [kJ/kg] ja c_{ph} on vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]. Kun tiedetään alku- ja lopputilanteen entalpia, voidaan laskea entalpiaero, jolla voidaan laskea järjestelmän lämmitys- tai jäähdytysenergia [13]:

$$Q_{jääh/läm} = \Delta h m' \Delta t \quad (35)$$

missä Δh on entalpiaero [kJ/kg], m' on ilman kokonaismassavirta [kg/s], Δt on aika-askel [s].

3.2.2.2. Putkimateriaalin mekaanisten ja termisten ominaisuuksien vaikutus

Lämmönsiirtoputken keskimääräinen lämmönjohtavuus on 0,28 W/mK. Vaahdottoman polypropeenin käyttö pääaineena mahdollistavat paremmat mekaaniset ominaisuudet, kuten taivutusjäykkyyden ja iskunkestävyyden. [17] Lämmönsiirtoputken toisena vaihtoehtona voi käyttää myös polyeteenistä valmistettuja putkia, joilla lämmönjohtavuutena on 0,38 W/mK ja matalammat mekaaniset ominaisuudet polypropeeniputkiin verrattuna. [42] Polypropeeniputkilla voidaan saavuttaa yhtä hyviä mekaanisia ominaisuuksia kuin polyeteeniputkilla käyttäen ohuempia putkia, jolloin saavutetaan myös parempi lämpökonduktanssi. Siten myös maaperän ja ilman välinen lämmönsiirto sekä lämmöntasaajan hyötysuhde paranee. Lisäksi putken korkeataivutusjäykkyys estää tiivistyneen veden kertymisen eli vesipussien muodostumisen. [17]

3.2.2.3. Maalajin ominaisuuksien vaikutus

Suomen maaperä on pääosin peräisin jääkaudelta sekä sitä seuraavalta ajalta. Edellinen jääkausi ja sitä seuraavat olosuhteet ovat vaikuttaneet maaperän muodostumiseen merkittävästi. Kilometrien korkuisten jäävuorien paino on vaikuttanut maankamaran muodostumiseen. Myös jään liukuessa kallioperän rikkonaisissa osista on irronnut kiviaineet ja sekoittunut maalajeihin jääkauden jälkeen. Mannerjäätikön kallioperästä irrottamat ja jauhamat kiviainekset ovat sekoittuneet jälkeinpäin pinnalla olleisiin maalajeihin, jolloin on muodostunut moreenikerrostumat. Mannerjäätikön liukuminen on synnyttänyt moreenipeitteitä, joita on lähes 60 %:lle Suomen pinta-alasta ja useilla muillakin alueil-

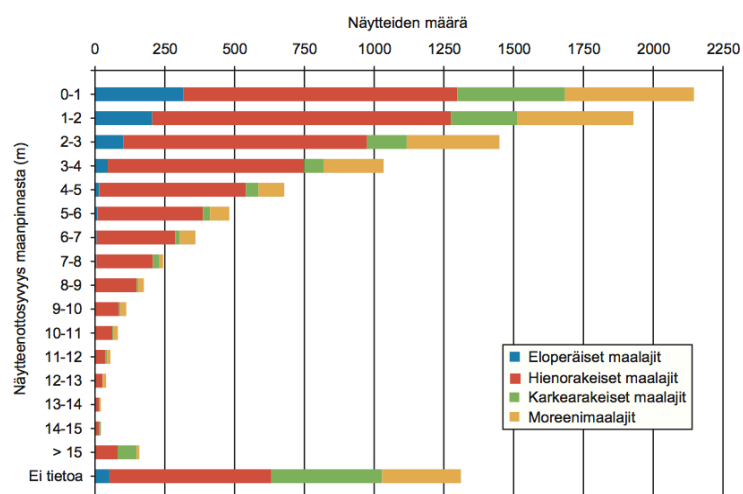
la on moreenia muiden maalajikerrostumien alla. Koko Suomessa moreenikerrosten keskipaksuus on noin 4 m. Suomen rannikoilla moreenikerrosten muodostumat ovat ohuempia verrattuna manneralueiden muodostumiin. [43]

Maalajit jaetaan geologisen syntytaavan, humuspitoisuuden ja raekoostumuksen perusteella maalajiryhmiin: eloperäiset maalajit kuten turve ja lieju, hienorakeiset maalajit kuten savi ja siltti, karkearakeiset maalajit kuten hiekka ja sora, sekä moreenimaalajit jotka sisältävät useita eri lajitteita kuten siltti, hiekka ja sora. Kuvassa 40 esitetään näitä ryhmiä, niiden sisältäviä maalajia sekä niiden lajitepitoisuuksia ja raekokoja. [45]

Maalajiryhmä	Maalaji	Lyhenne	Lajitepitoisuus, paino-%			Raekoko d_{50} , mm
			Savi	Hienoaines	Sora	
Eloperäiset maalajit	Turve	Tv				
	Lieju	Lj				
Hienorakeiset maalajit	Savi	Sa	≥ 30			
	Siltti	Si	< 30	≥ 50	< 5	$\leq 0,06$
Karkearakeiset maalajit	Hiekka	Hk		< 50	≤ 50	$> 0,06...2$
	Sora	Sr		< 5	> 50	$> 2...60$
Moreenimaalajit	Silttimoreeni	SiMr		≥ 50	≥ 5	$\leq 0,06$
	Hiekkamoreeni	HkMr		5...50	5...50	$> 0,06...2$
	Soramoreeni	SrMr		≥ 5	> 50	> 2

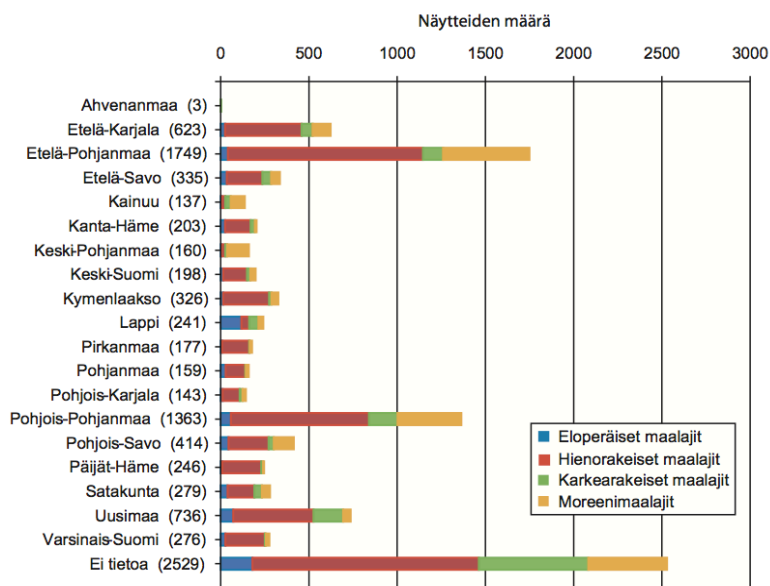
Kuva 40. Geotekninen maalajiluokitus ja maalajit

Ympäristökeskuksen tekemä maaperätutkimuksen mukaan ympäri Suomea on kerätty maaperänäytteitä vuosina 1962–2001. Tutkimuksessa on käytetty 10297 näytettä, jotka on luokiteltu näytteenottosyvyyden ja maakunnan mukaan. Kuten kuvassa 41 on esitetty, suurin osa kerätyistä näytteistä on ollut läheltä maapintaa, joista suurin osa hienorakeisia maalajia kuten savea ja silttiä. [43]



Kuva 41. Aineiston näytteiden määrä eri syvyyksiltä.

Kuvassa 42 on esitetty näytteiden jakaumia maakunnittain. Kuvien perusteella on vaikea tehdä oikea johtopäätös kaikkien maakuntien yleisistä maaperälajeista, sillä joistakin maakunnista on kerätty vähemmän näytteitä. Myös maalajien maakunnittain vaihtelun lisäksi maalajit vaihtelevat paikkakunnittain, jopa alueittain. Tästä syystä helpompi tapa maalajien ennustamiseen olisi paikkakuntien maaperäkartan käyttö ja silmävarainen tunnistaminen. Silmävarainen tarkastelu on yksinkertaisin tapa tunnistaa maalaji. Maalaji voidaan tunnistaa joko tunnistamalla välillisesti geologinen muodostuma tai suoraan tunnistamalla maalaji. Tämä edellyttää kuitenkin maaperän geologisen rakenteen ja geoteknisten ominaisuuksien tuntemista. [45]



Kuva 42. Aineiston näytteiden määrä eri maakunnista.

Tässä diplomityössä esimerkikohteena käytetään Aalto yliopiston toimistorakennuksista Metallimiehenkuja 10:tä. Esimerkikohteen maalaji voidaan helposti tarkastaa Espoon kaupungin tarjoamasta karttapalvelusta, josta voidaan määrittää myös maakerrosten paksuus ja rakennettavuusluokka. [53] Esimerkikohteen maalaji on esitetty karttapalvelusta otetussa kuvassa 60 ja laitettu liitteeksi. Samassa kuvassa esitetään myös maalajiluokka. Karttapalvelun mukaan esimerkikohteen maalaji on enimmäkseen moreenialue, jossa moreenin paksuus on yli 1 m ja moreenikerroksen alla esiintyy kallio. Maaperäkartan tietojen mukaan esimerkikohteen ympäristö on rakennettavuusluokaltaan luokka 2 eli normaalisti rakennettava. Tämä tarkoittaa, että rakennettava-alueella on kallioalueet ja vaihteleva moreenimaasto, jolla kantava maakerros enintään 2,5 met-

rin syvyydessä. [54] Täten laskentatyökaluun voidaan asettaa lähtötiedoksi, että maaperä on moreeni maanpinnasta 2,5 metrin asti ja siitä alaspäin on kallio.

Moreeni on Suomen yleisin maalaji, jossa on useita lähikokoisia lajitteita keskenään sekoittuneena. Moreeni jakaantuu keskenään sekoittuneen aineen mukaisesti alalajikkeisiin ja Suomen moreeneista noin 75 % kuuluu hiekkamoreeneihin. Toinen moreeni maalaji on soramoreeni, joka muodostaa 10 % Suomen moreeneista. Hiekkamoreenin ja soramoreenin yhtenäisominaisuus on korkea vedenläpäisevyys. Vedenläpäisevyydeltään heikkoa maalajia ovat hienoaineksiset moreenit, jotka muodostavat vain 15 % Suomen moreeneista. [55]

Tässä diplomityössä meitä kiinnostavat enintään maalajin termiset ominaisuudet, kuten lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti. Koska nämä ominaisuudet vaikuttavat lämmöntasaajajärjestelmän hyötysuhteen merkittävästi. Ennen suunnittelua on tärkeä ennustaa rakennettavan alueen maalaji ja tietää sen termisiä ominaisuuksia. Maan lämmönjohtavuuteen vaikuttaa useita eri tekijöitä, kuten vesipitoisuus, huokoisuus, lämpötila, tiheys, mikrorakenne, mikrogeometria ja mineraalikoostumus. [44] Toisaalta on hyvin hankala tietää maaperän sen hetkisiä vesipitoisuuksia ja olotilaa. Näiden lisäksi maalajin mikrorakenne sekä mineraalikoostumus tekevät lämmönjohtavuuden laskemisesta vielä hankalampaa tuntipohjaisella dynaamisella menetelmällä. Sen tilalle aikaisemmin saatujen keskimääräisten lämmönjohtavuuden mittaustulosten käyttö helpottaa laskentaa ja vähentää laskenta-aikoja. Samoin ominaislämpökapasiteettien ja tiheyksien määrittämisessäkin voi käyttää tieteellisiä mittaustuloksia. Tätä varten on kerätty lämmönjohtavuus-, ominaislämpökapasiteetti- ja tiheysarvoja muiden tekemistä tieteellisistä tutkimuksista. Näitä arvoja on tallennettu laskentatyökalun kirjastoon, jotta voidaan käyttöliittymässä kutsua niitä maalajin mukaan luetteloruudun avulla. Jos tiedetään rakennettavan alueen maaperän termiset ominaisuudet, voidaan niitä asettaa myös erikseen lähtötiedoksi laskentatyökalussa.

Auringon säteilyn säätelemä maanpinnan lämpötila muuttuu ajan suhteen. Samanaikaisesti epäsäännölliset sään muutokset, kuten lämpötilamuutokset, tuulinopeuksien muutokset jne. aiheuttavat myös epäsäännöllisiä pintalämpötilan muutoksia. Maanpinnalla tapahtuvat lämpötilamuutokset siirtyvät maa- ja kallioperään vaimentuen ja pintalämpö-

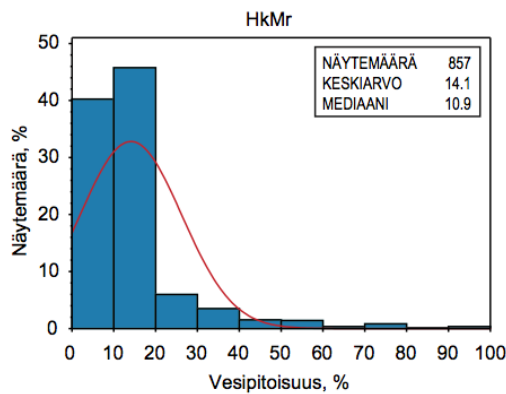
tilan vaihtelu ulottuu syvyysulottuvuudelle asti, jossa maaperän lämpötila on riippumaton maanpinnan lämpötilamuutoksista. Tämän syvyyden määrittämiseen käytetty terminen diffusiviteetti on täysin riippuvainen maalajin fysikaalisesta ja termisistä ominaisuuksista, kuten lämmönjohtavuudesta, ominaislämpökapasiteetista ja tiheydestä. Terminen diffusiviteetti vaihtelee maalajin mukaan. Kun kallion terminen diffusiviteetti vaihtelee 10^{-6} - $2 \cdot 10^{-6}$ m²/s välillä, irtomaalajien diffusiviteetti vaihtelee $0,1 \cdot 10^{-6}$ - $0,5 \cdot 10^{-6}$ m²/s välillä. [23]

Syvyysulottuvuuden alapuolella maankamaran lämpötila enää on maanpinnan keskilämpötilan ja lämpövuon säätelmä. Lämpövuon maapallon pintaa kohti johtuvan lämpövirran tiheys, joka syntyy maan sisällä radioaktiivisen aineiden hajoamisen seurauksena. Kokeellisen Fourierin ensimmäisen lain eli lämmönjohtumislain mukaan lämpövuon tiheys q_{geo} [W/m²] riippuu maalajin lämmönjohtavuudesta k [W/(mK)] ja lämpötilagradientista $\delta T/\delta h$ [K/m]. Kairareissä eri korkeuksilla mitattu lämpötilaero antaa meille lämpötilagradientin. Suomessa lämpötilagradientin arvo vaihtelee yleisesti 8-15 K/km välillä. Lämpövuon [W/m²] voidaan laskea tällä kaavalla [23]:

$$q_{\text{geo}} = -k \frac{\delta T}{\delta h} \quad (36)$$

Suomessa keskimääräinen lämpövuon on noin 40 mW/m². Lämpövuon lämmönsiirtopinta-alan kanssa laskeminen antaa meille lämpötehon, joka kuvastaa radioaktiivisen aineiden hajoamisen aiheuttamaa vaikutusta laskenta-alueelle. Täten syvyysulottuvuuteen kiinnitettyihin solmupisteisiin se on lisättävä lämpövirran kaavalla (12).

Laskentatuloksiin vaikuttava maaperän toinen ominaisuus on vesipitoisuus, mikä tarkoittaa maassa olevan veden massan ja kuivan maa-aineksen massan suhdetta. Ympäristökeskuksen tekemän maaperätutkimuksen mukaan hiekkamoreenista on otettu näyttemäärä 857 ja vesipitoisuuden keskiarvo on ollut 14,1 %, kuten on esitetty kuvassa 43. Muiden moreenimaalajeihin verrattuna tämä määrä on ollut huomattavasti pienempi. Syystä tähän on ollut hiekkamoreenin korkea vedenläpäisevyys. [43]



Kuva 43. Hiekkamoreenin vesipitoisuuden mittaustulokset

Maalajin tiheys vaikuttaa myös lämmöntasaajajärjestelmän toimintaan. Maalajin tiheys määräytyy enimmäkseen maalajin sisältämien rakeiden mineraalikoostumuksen ja maalajin sisältämän eloperäisen aineksen perusteella. Suomen moreenimaalajien keskimääräinen tiheys on $2,65 \text{ t/m}^3$. [32] Lämpötekniikalta ominaisuuksiltaan erilaisilla maalajeilla on erilaiset termiset diffusiviteetit, jotka määritetään lämmönjohtavuuden, ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden avulla. Termisten diffusiviteettien avulla lasketaan syvyyssulottavuus. Esimerkkikohteen yleiselle maalajille moreenille termisen diffusiviteetiksi on laskettu $s = 7,22 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, jonka on laskettu tunkeutumissyvyys $d = 2,693 \text{ m}$. Tunkeutumissyvyyden avulla laskettu syvyyssulottavuus on sittenkin $13,46 \text{ m}$, mikä tarkoittaa, että vuosittaisen pintalämpötilan muutokset ehtivät vaikuttamaan korkeintaan $13,46$ metrin syvyyteen asti.

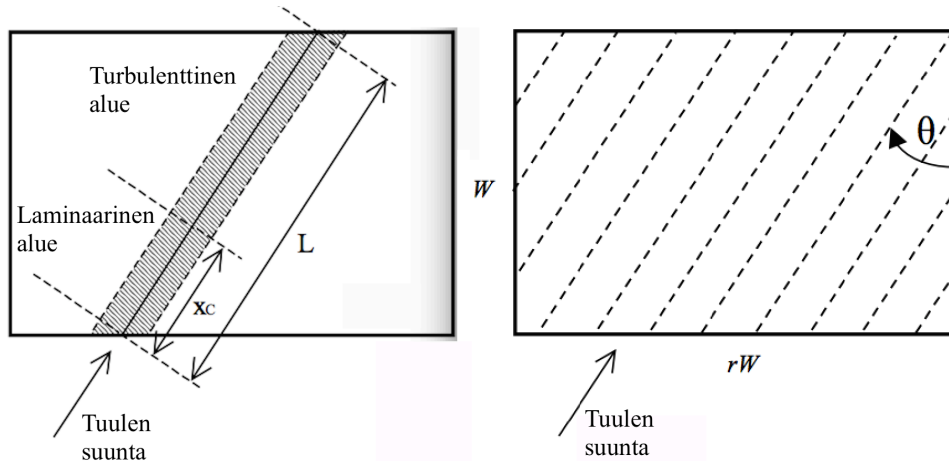
3.2.2.4. Lämmönsiirtoputken pituuden vaikutus

Laskentatyökalulla tehtyjen kokeilujen jälkeen huomattiin, että putken pituuden lisääminen on kasvattanut lämmitys- ja jäähdytysenergiaa, eikä kasvu ole lineaarinen. Toisaalta lämmönsiirtoputken pituuden kasvattaminen on aiheuttanut lisää kitkapainehäviöitä, joista aiheutuu kuluttajalle lisää investointikustannuksia sekä käyttökustannuksia. Tästä syystä on löydettävä optimipituus, jotta lämmöntasaajajärjestelmän hyötysuhde pysyisi toivotuilla rajoilla.

3.2.2.5. Tuulen nopeuden ja suunnan vaikutus

Ympäristöministeriön julkaisema testivuosi TRY2012 ilmoittaa tunnitaisia tuulen nopeus- ja suunta-arvoja. Nopeusarvot vaihtelevat toisistaan merkittävästi ja joissakin tapauksissa tuulen nopeus on 0 eli kyseessä on tyyni sää. Tuulen nopeuden ja suunnan tunnitaiset vaihtelut vaikuttavat maanpinnan ja ulkoilman väliseen konvektiokerto-

meen, minkä johdosta konvektion avulla siirtyvä lämpö vaihtelee. Tuuliolojen lisäksi konvektiokertoimeen vaikuttaa myös maanpinnan karheus. Nämä kaikki vaikuttavat maanpinnalla olevaan lämpötaseen, joten virtaustekninen tutkimus on tehtävä huolellisesti, jotta saadaan laskentatyökalu toimimaan mahdollisimman todenmukaisesti.



Kuva 44. Virtaus tuulen eri suunnilla

Joissakin tapauksissa tuulen suunta voi olla niin muuttuva, jotta on tarpeen arvioida lämmönsiirtokertoimen keskiarvo yli tuulen suunnan sekä alueen. Seuraavassa on laskettu keskimääräinen virtauspituus kunkin tuulen suuntaan olettaen, että kaikki tuulen suunnat ovat yhtä todennäköisiä. [46]

$$L_{\text{kesk}} = (0,899 - 0,032t)l \quad (37)$$

missä

$$l = 4A/P \quad (38)$$

ja

$$t = 4\sqrt{A}/P \quad (39)$$

missä L_{kesk} on keskimääräinen virtauspituus [m], A on suorakulmion (rakennettavan alueen) pinta-ala [m^2] ja P on ympärysmitta [m]. Tuulen suunnan jatkuvasti muuttuessa kriittinen etäisyys, jolloin virtaus muuttuu turbulentiksi, on laskettava keskimääräiseksi. Ulkoilman virtauksessa virtaustyyppi vaihtuu silloin kun Reynoldsin luku saavuttaa 5×10^5 . Kriittisen etäisyyden lasketaan tällä kaavalla [46]:

$$x_c = 5 \times 10^5 v/w \quad (40)$$

missä x_c on kriittinen etäisyys [m], v on kinemaattinen viskositeetti [m^2/s] ja w on tuulen nopeus [m/s]. Siten keskimääräinen kriittinen etäisyys lasketaan seuraavasti [46]:

$$x_{c,kesk} = x_c \left(\frac{0,096+0,941r}{1+0,777r} \right) \left(\frac{1+r-0,589\frac{x_c}{W}}{r} \right) \quad (41)$$

missä $x_{c,kesk}$ on keskimääräinen kriittinen etäisyys [m] r on suorakulmion mittojen suhde ($r \geq 1$) ja W on suorakulmion pienempi mitta [m]. Kuitenkin suorakulmiossa keskimääräinen kriittinen etäisyys on noin yhtä sama kuin kriittinen etäisyys ($x_{c,kesk} \approx x_c$). Näiden tietojen valossa voidaan nyt laskea keskimääräinen Reynoldsin luku, jonka avulla enustetaan virtaustyyppi [46].

$$Re_{kesk} = \frac{wL_{kesk}}{v} \quad (42)$$

Jos Reynoldsin luku on enemmän kuin 5×10^5 virtaus on turbulenttinen, muuten laminaarinen. Seuraavaksi voidaan laskea Nusseltin luku huomioon ottaen myös maanpinnan karheus [46].

$$Nu = R_f (0,037 Re_{kesk}^{0,8} - 871) Pr^{1/3} \quad \text{jos virtaus on turbulenttinen} \quad (43)$$

$$Nu = R_f 0,664 Re_{kesk}^{0,5} Pr^{1/3} \quad \text{jos virtaus on laminaarinen} \quad (44)$$

missä R_f on maanpinnan karheuskerroin, joka on listattu taulukossa 4 [47].

Taulukko 4. Pakotetun konvektion karheuskertoimet eri pintatyypeille

Karheus indeksi	R_f	Karheus indeksi	R_f
Erittäin tasainen	1	Keskimääräisen karhea	1.52
Tasainen	1.11	Karhea	1.67
Keskimääräisen tasainen	1.13	Erittäin karhea	2.17

Tyynessä säässä, jolloin tuulen nopeus on 0, ulkoilman ja maanpinnan välillä tapahtuu luonnollinen konvektio. Luonnollinen konvektio riippuu pinnan geometriasta, lämmönsiirron suunnasta, ulkoilman ja maanpinnan lämpötiloista, sekä ulkoilman termisistä ominaisuuksista. Luonnollisen konvektion luonne määritetään Rayleighin luvulla, jonka lasketaan seuraavasti [38]:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_a)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (45)$$

missä g on putoamiskiihtyvyys [m/s^2], T_s on maanpinnan lämpötila [$^{\circ}K$], T_a on ulkoilman lämpötila [$^{\circ}K$], L_c on karakteristinen pituus [m] ja β on lämpölaajenemiskerroin [$1/K$], joita lasketaan näillä kaavoilla [38]:

$$L_c = \frac{A}{P} = \frac{W \cdot rW}{2(W + rW)} \quad (46)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{(T_s + T_a)/2} \quad (47)$$

Lopuksi lämmönsiirron suunnan ja Rayleigh luvun arvon mukaan voidaan laskea Nusseltin luku seuraavasti [38]:

$$\text{Jos } T_\infty > T_s \quad \text{ja} \quad 10^4 < Ra < 10^7 \quad Nu = 0,54Ra^{1/4} \quad (48)$$

$$\text{Jos } T_\infty > T_s \quad \text{ja} \quad 10^7 < Ra < 10^{11} \quad Nu = 0,15Ra^{1/3} \quad (49)$$

$$\text{Jos } T_\infty < T_s \quad \text{ja} \quad 10^5 < Ra < 10^{11} \quad Nu = 0,27Ra^{1/4} \quad (50)$$

Lopuksi voidaan laskea maanpinnalla virtaavan ulkoilman konvektiokertoimen $[W/m^2K]$ tällä kaavalla [38]:

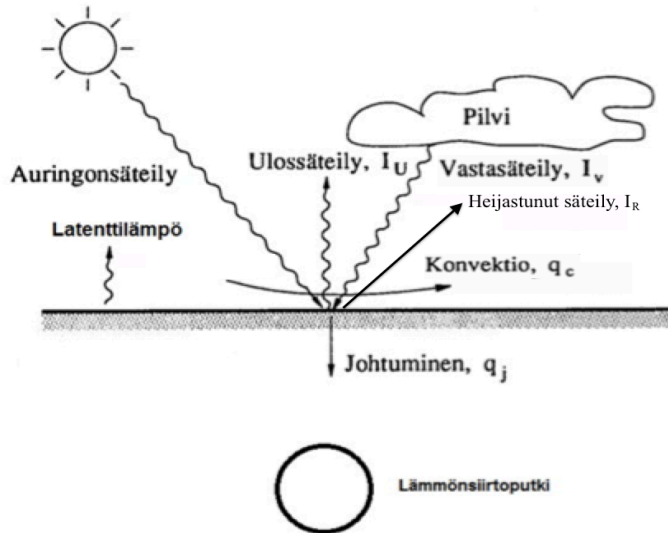
$$\alpha_i = \frac{Nuk_{ilma}}{L_c} \quad (51)$$

Ulkoilman konvektiokerrointa käytetään ulkoilman ja maanpinnan lämpökonduktanssin laskemisessa kaavojen (5,6) avulla, jolloin voidaan tutkia ulkoilman lämpötila- ja nopeusvaihtelujen vaikutusta maapinnalle kiinnitettyihin lämpötilapisteisiin eli solmupisteisiin. Jokaisella solmupisteellä on oma energiantaseyhtälö, jonka avulla voidaan tutkia energiansiirtymistä solmupisteestä toiseen 15 minuutin aika-askeleilla. Tämän toistuvan prosessin avulla voidaan seurata maaperän soluissa tapahtuvia lämpötilamuutoksia, jotka aiheutuvat maanpinnan ja ulkoilman välisen konvektion lisäksi säteilytasopainosta ja kosteudensiirtymisestä.

3.2.2.6. Maanpinnan ja ulkoilman välisen energiataseen vaikutus

Maanpinnan ja ulkoilman välisellä lämpötaseella on suuri vaikutus maaperän sisällä olevaan lämmönjakaumaan, joka vaikuttaa lämmöntasaajajärjestelmän toimintaan positiivisesti tai joskus negatiivisesti. Koska maaperällä on kyky varastoida lämpöä, maanpinnalla tapahtuva liiallinen auringonsäteily voi aiheuttaa maaperässä ylikuumenemista, josta johtuen loppukesällä maaperä ei kykene enää viilentämään tuloilmaa. Tällaiseen tilanteen aiheuttaa enimmäkseen maanpinnan heijastuskyky, joten suunnittelussa on hyvä tutkia maanpinnan ja ulkoilman välistä lämpötasetta. Toisaalta maaperän lämpeneminen loppukesällä on haluttu tilanne, jotta voidaan hyödyntää varastoitua lämpöä tuloilman lämmittämiseen talvella. Koska maanpinnan valinnalla on suuri vaikutus järjestelmän hyötysuhteen, suunnittelijan on tutkittava onko siitä hyötyä silloin, kun rakennettua aluetta käytetään asfaltilla pinnoitettuna pysäköintialueena tai piha-alueena

tai rakennuksen alle jne. Tässä diplomityön osassa tutkittiin maanpinnan lämpötaseeseen vaikuttavaa maan säteilytasapainoa, ulkoilman ja maanpinnan välistä konvektiota ja sääolosuhteiden vaikutusta esim. vesihöyryn tiivistymistä.



Kuva 45. Maanpinnan lämpötaseen lämpövirrat

Maan säteilytasapaino on tase maahan tulevan lyhytaaltainen auringon säteilyn ja maasta lähtevän lyhytaaltoisena heijastuneen ja lämmöstä syntyvän pitkäaaltoisen säteilyn välillä. Osa maanpinnalle saapuvasta lyhytaaltoisesta säteilystä heijastuu suoraan pois, suurin osa yleensä absorboituu maahan. Osa maahan absorboituneesta lämmöstä poistuu maasta takaisin ilmakehän alimpiin osiin pitkäaaltoisena lämpösäteilynä. Jos säteilytase on positiivinen, maa lämpenee, muulloin maa kylmenee. [49]

Auringonsäteily on auringon lähettämää säteilyä, joka vaihtelee vuodenaikojen ja pilvisyyden mukaan. Auringonsäteily vaikuttaa kaikkiin sään muutoksiin ja elinolosuhteisiin. Auringonsäteilyn vaikuttama maanpinnan lämpötila riippuu säteilyn määrästä, pinnan laadusta, lämmönjohtavuudesta, lämpökapasiteetista, ilmavirran nopeudesta sekä maanpinnalla tapahtuvista sääilmiöistä. Kuvassa 45 on esitetty maanpinnan lämpötilaan vaikuttavat tekijät. Maanpinnalle kohdistuva kokonaissäteily muodostuu suorasta auringonsäteilystä ja hajasäteilystä. [50] Ympäristöministeriön julkaisemana testivuotena TRY2012 on esitetty vaakapinnalle kohdistuvat kokonaissäteilyarvot, joiden avulla tutkitaan maanpinnan lämpötilamuutoksia. Maanpinnan lämpötaseen määrittämisessä on huomioon otettava heijastunut lyhytaaltainen säteily, joka lasketaan seuraavasti [11].

$$I_R = I_T \varphi \quad (52)$$

missä I_R on heijastunut lyhytaaltainen säteily [W/m^2], I_T on kokonaissäteily [W/m^2] ja φ on heijastavan pinnan albedo. Albedo tarkoittaa maanpinnasta heijastuvan ja sille osuvan säteilymäärän suhdetta. Heijastavuussuhteen vaikuttavat muun muassa maatyypit, kasvillisuus, maaston muodot sekä rakennettu ympäristö. Siis $I_T(1 - \varphi)$ kuvastaa lyhytaaltoisesta auringonsäteilystä maahan absorboitunutta osuutta. [11] Erilaisten pitojen albedo-arvot löytyvät laskentatyökalun kirjastosta. Laskentatyökalun käyttöliittymässä luetteloruudun avulla voi valita maanpinnantyyppiä, jonka jälkeen albedo-arvo sijoittuu laskentayhtälöissä oikeisiin paikkoihin.

Pitkäaaltoiseen säteilyyn kuuluu pinnan ulossäteily ja ilmakehän vastasäteily. Maanpinnan pitkäaaltoisen ulossäteilyn I_U voimakkuus riippuu säteilevän pinnan pintalämpötilasta T_p ja sen emissivyydestä ε . Ilmakehän vastasäteily I_V on ilmakehässä olevan vesihöyryn, hiilidioksidin ja otsonin maanpinnalle takaisin säteilemää pitkäaaltoista lämpösäteilyä. Niiden erotus antaa meille pitkäaaltoinen nettosäteily q_s ja se voidaan laskea seuraavalla kaavalla [11]:

$$q_s = I_U - I_V = \varepsilon \sigma T_s^4 [0,22 + 0,148 \exp(-0,117 P_h)] \cdot [1 - B f(H)] \cdot f(Y) \quad (53)$$

missä, q_s on pitkäaaltoinen nettosäteily [W/m^2], ε on maanpinnan emissivisyys, σ on Stefanin-Boltzmannin vakio ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$), T_s on maanpinnan lämpötila [K], P_h on vesihöyryn osapaine [mbar], B on suhteellinen pilvisuus ($B=0$ pilvettömällä säällä ja 1 täysin pilvisellä säällä), $f(H)$ ottaa huomioon pilvien lämpötilan laskun korkeuden kasvaessa ja $f(Y)$ ottaa huomioon pinnan kaltevuuden. [11] Taulukossa 5 ja 6 esitettiin $f(H)$ ja $f(Y)$ arvoja.

Taulukko 5. Pilvien korkeuden vaikutus pitkäaaltoiselle nettosäteilylle

H = Pilven korkeus					
H [km]	0	2	4	6	8
f(H)	1	0,8	0,66	0,53	0,43

Taulukko 6. Maanpinnan kaltevuuden vaikutus pitkäaaltoiselle nettosäteilylle

Kallistus vaakatasosta							
Y=	0	20	40	60	80	90	
f(Y)=	1	0,98	0,93	0,82	0,64	0,52	P _h =0 mbar
f(Y)=	1	0.96	0.87	0.73	0.54	0.4	P _h =8 mbar

Maanpinnan emissiokerroin tarkoittaa pinnan lähettämän säteilyn ja samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen lähettämän säteilyn suhdetta. Emissiokerroin on aina välillä $0 < \epsilon < 1$. Eri aallonpituuksilla on eri emissiokertoimet, mutta useimmiten emissiokertoimen ilmoitetaan pitkäaaltoiselle säteilylle. [11] Erilaisten maanpintojen emissiokertoimet on tallennettu laskentatyökalun kirjastoon, josta haetaan emissiokertoimen arvo luetteloruudun avulla valitun maanpintatyyppin mukaan.

Suomen pilvityypeistä on hyvin rajallinen määrä tietoa. Pilvenpalvontaseuran virallinen julkaisun Pilvibongarin oppaan mukaan kumpukerrospilvi on yleisin pilvityyppi, varsinkin talvella ja kumpukerrospilvet esiintyvät yleensä 2,4 km ja siitä alla. [51] Interpoloinnin avulla pilvikorkeuden huomioon ottavan vakion $f(H)$ arvoksi löydettiin 0,772 ja oletettiin, että $f(H)$ arvo pysyy samana koko vuodenajan. Oletettiin myös, että maanpinnan kallistus vaakatasosta on 0 eli $f(Y)$ on 1.

Suhteellinen pilvisyys vaihtelee vuodenajan ja paikkakunnan mukaan. Kuvassa 46 on esitetty keskimääräinen pilvisyys eräillä paikkakunnilla. Keskimääräinen pilvisyys tarkoittaa aamu-, päivä- ja iltapilvihavainnon keskiarvoa. Keskimääräisen pilvisyyden taulukko antaa meille mahdollisuutta vertailla eri paikkakuntien pilvisyyttä toisiinsa. Koska diplomityön esimerkkikohde on pääkaupunkiseudulla, voidaan soveltaa Helsingin pilvisyysarvoja Espoon kaupungin kohteisiin. Laskentatyökalu käyttää sääolosuhteiden tunnittaisia arvoja, joten tarkkuuden kannalta olisi parasta käyttää myös pilvisyyden tunnittaisia arvoja. Laskentatyökalussa kuitenkin käytettiin pilvisyyden kuukausittaisia keskiarvoja. [50]

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Vuosi
Uttö	82	70	62	60	51	51	52	56	63	76	84	84	66
Marianhamina	77	71	64	61	53	55	57	57	63	73	80	80	66
Helsinki	79	73	65	64	60	57	58	58	65	75	84	85	69
Jokioinen	79	72	63	63	58	61	61	61	66	77	83	83	69
Lappeenranta	81	73	62	65	59	58	59	60	68	79	86	85	70
Jyväskylä	79	73	64	64	59	58	57	62	68	79	84	85	69
Vaasa	73	70	62	63	54	57	58	61	68	73	78	79	66
Pielisjärvi	80	72	63	63	58	58	56	61	72	81	84	84	69
Kajaani	77	71	63	63	59	60	58	60	68	79	83	82	69
Oulu	72	69	61	65	59	61	59	63	69	74	78	78	67
Kuusamo	76	74	68	68	67	66	63	69	74	82	83	81	73
Sodankylä	74	74	68	70	69	69	66	71	76	78	81	79	73
Pallasjärvi	83	77	71	68	66	66	62	68	74	81	84	89	74
Inari	71	61	67	68	77	74	72	78	79	78	83	74	73
Utsjoki	65	60	61	64	74	68	66	74	75	73	74	67	69

Kuva 46. Keskimääräinen pilvisyys eräillä paikkakunnilla

Maanpinnalla tapahtuvassa, ulkoilman sisältämän vesihöyryn muodonmuutoksesta aiheutuu myös piilevä lämpövirta maanpinnan ja ulkoilman välillä. Kostean ja lämpimän ilman osuessa viileään maanpintaan aiheutuu vesihöyryn tiivistyminen, jonka seurauksena maanpinnalle vapautuu tiivistynyttä vettä ja latenttilämpöä. Vastaavasti maanpinnalla kertyneen veden höyrystyessä, ulkoilmaan siirtyy latenttilämpöä ja kosteutta. Siksi on tarkistava myös piilevän lämpövirran vaikutus maanpinnan ja ulkoilman väliseen lämmönsiirtoon. Tiivistymisen ja höyrystymisen aiheuttamaa latenttilämpöä tutkitaan H.L. Penmanin kehittämällä lähestymistavalla. Lähestymistapa olettaa, että maanpinnalla on kosteudesta kyllästynyt pinnallinen kerros, myös maanpinnan ja ulkoilman välinen kosteuden siirto on riippuvainen niiden erotuksesta, tuulen nopeudesta, maaperän kosteuskuormasta sekä kasvillisuudesta. [52]

$$LE = F(u)(P_p^s - P_a) \quad (54)$$

missä P_p^s [Pa] on maanpinnan lämpötilan mukainen kosteudessa kyllästyneen vesihöyryn osapaine, P_a [Pa] on ulkoilman vesihöyryn osapaine. P_p^s voidaan laskea seuraavasti:

$$P_p^s = 100\% * \frac{\exp\left(77,345 + 0,0057T_s - \frac{7235}{T_s}\right)}{T_s^{8,2}} \quad (55)$$

missä T_s on maanpinnan lämpötila [K].

$$P_a = RH * \frac{\exp\left(77,345 + 0,0057T_a - \frac{7235}{T_a}\right)}{T_a^{8,2}} \quad (56)$$

missä RH on ulkoilman sen ajanhetken suhteellinen kosteus ja T_a on ulkoilman lämpötila [K]. $F(u)$ voidaan laskea tällä kaavalla:

$$F(u) = 0,0168f\alpha_i \quad (57)$$

missä f on maaperän kosteussisällön ja kasvillisuuden esittävä vakio ja α_i on ulkoilman kovektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/m^2K], joka muuttuu tuulen nopeuden mukaan. Kuitenkin Penman on kehittänyt laskelmien yksinkertaistamiseksi tavan, jolla voidaan laskea latenttilämpöä kaavalla:

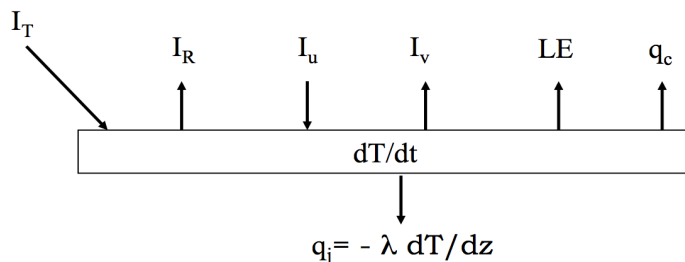
$$LE = 0,0168f\alpha_i[(aT_s + b) - RH(aT_a + b)] \quad (58)$$

missä LE on latentti lämpövirta [W/m^2], f on maan pintatyypistä sekä kosteustasosta riippuvainen vakio, α_i ulkoilman konvektiokerroin [W/m^2K], a on vakio (103 Pa/K), b on vakio (609 Pa), T_s on maanpinnan lämpötila [K], RH on ulkoilman suhteellinen kos-

teus ja T_a on ulkoilman lämpötila [K]. Mikäli LE on negatiivinen, kyseessä on haihtuminen ja vastaavasti mikäli LE on positiivinen, kyseessä on tiivistyminen. Jos on kyseessä paljas maapinta, f arvo vaihtelee maaperän keskimääräinen kosteuden mukaisesti näin:

märkä maapinta: $f = 1$
 kostea maapinta: $f = 0,6-0,8$
 kuiva maapinta: $f = 0,4-0,5$
 erittäin kuiva maapinta: $f = 0,1-0,2$

Kasvillisuudeltaan ruohoisen maanpinnan f arvo löydetään kertomalla ylläällä esitetyt arvot 0,7:llä. Koska 75% Suomen moreenimaalajeista on hiekkamoreeni, korkean todennäköisyyden vuoksi voidaan olettaa maaperän olevansa hiekkamoreenia. Hiekkamoreenin korkea-asteisen vedenläpäisevyyden vuoksi maapinta oletetaan kuivaksi. Lisäksi laskentatyökalun käyttäjäliittymässä maanpintatyyppiä voidaan muuttaa. Jos valittu maanpintatyyppi on nurmikko, silloin f arvoksi lasketaan $0,5 * 0,7 = 0,35$.



Kuva 47. Maanpinnan ja ulkoilman välinen energiatase

Kuvassa 47 esitetään maanpinnalla tapahtuva energiatase, jossa on mukana mm. nettosäteily, latenttilämpö, konvektio ja johtumislämmönsiirto. Siis energiatase tulee olemaan näin:

I_T Kokonaisaurinkosäteily vaakapinnalle + I_U Pitkäaaltoinen vastasäteily = I_R Heijastunut lyhytaaltoinen säteily + I_V Pitkäaaltoinen ulossäteily + LE Piilevä lämpö + q_c Konvektio + q_j Johtuminen

3.2.2.7. Lumipeitteen vaikutus

Lumipeite vaikuttaa maanpinnan ja ulkoilman väliseen lämmönsiirtoon merkittävästi, sillä lumipeite toimii luonnollisena lämpöeristeenä matalan lämmönjohtavuutensa vuoksi. Varsinkin alkutalvella huokoisen, tiheydeltään kevyen lumen kiderakenteeseen on sitoutunut paljon ilmaa, joten lumipeite eristää lämpöä hyvin maanpinnan ja ulkoilman välillä. Lumipeite koostuu useista paksuudeltaan erilaisista kerroksista epäsäännöllisten lumisateiden, lumen painovoiman ja lumen päällä tapahtuvien sääolosuhteiden vuoksi. Näiden tekijöiden vuoksi kiderakenteiden ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Lumipeitteen kiderakenne vaikuttaa merkittävästi fysikaalisiin ja lämpötekniisiin ominaisuuksiin, kuten huokoisuuteen, tiheyteen ja näiden molempien ansiosta lämmönjohtavuuteen sekä eristävyyskykyyn. Alkutalvella tiheydeltään kevyen lumen tiheys kasvaa talven jatkuessa, minkä vuoksi lumen lämmönjohtavuus paranee. Lisäksi painovoimasta sekä muista tekijöistä johtuen lumikerros ohenee. Ohenemisen ja lämmönjohtavuuden paranemisen vuoksi lumen eristyskyky heikentyy. [48] Kuvassa 48 on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelman C4 ilmoittamat tiheys- ja lämmönjohtavuusarvot.

Aine, tarvike	Tiheys (ρ) kg/m ³	Ominaislämpökapasiteetti (c_p) J/(kg K)	Lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo (λ_0) W/(m K)
lumi			
pehmeä	200	2000	0,12
osittain tiivistynyt	300	2000	0,23
tiivis	500	2000	0,60

Kuva 48. Lumen fysikaaliset ja termiset ominaisuudet

Maapallon ilmastojärjestelmässä lumella on tärkeä vaikutus maapallon heijastuskyvyn kasvattamisessa, lumen hyvien heijastusominaisuuksiensa ansiosta, joten lumi vaikuttaa maapallon säteilytaseeseen. Koska puhtaan lumen albedo on 0,8-0,9 pysyvän lumen 0,7 ja sulavan lumen 0,4. Tämä arvo on merkittävästi korkea verrattuna maanpinnan vuotuihin keskiarvoon, joka on 0,25. [11]

Ilman lunta suuri määrä maahan saapuvasta auringonsäteilystä imeytyisi maanpintaan ja lämmittäisi maaperää ja ilmakehää. Lumen albedo vaihtelee myös vuodenajan mukaisesti. Alkutalvella kun lumen albedo on 0,8-0,9 välillä, lopputalvella määrä vähenee 0,4 asti. Siihen on syynä lumeen varastoitunut vesi ja lumeen kertyneet epäpuhtaudet, jotka aiheuttavat infrapunasäteilyn absorboitumista lumipeitteen pinnassa. [56]

Kk Month	Suhteellinen kosteus Relative humidity %					Sademäärä Precipitation mm			Sadepäivät Precipitation days					Suurin vrksade Max daily prec mm	Lumensyvyys Snow depth cm	
	Aika/Time UTC			Karvo	Keskim Mean	Suurin Max	V/Year	Pienin Min	V/Year	Kpl/Number			15 p. viim.p. 15th last day			
	00	06	12	18						Mean	≥0,1 mm	≥1,0 mm				≥10,0mm
304	HELSINKI KAISANIEMI															
1	88	86	84	86	86	52	90,8	2005	4,7	1996	19	12	1	18,5	14	21
2	87	87	80	84	85	36	100,9	1990	0,9	1994	17	8	1	18,2	21	23
3	87	86	73	79	81	38	68,8	1994	7,2	2005	15	8	1	18,1	23	14
4	81	76	64	69	73	32	79,4	2001	3,9	1987	11	7	1	36,3	1	-
5	79	69	58	62	67	37	68,9	2003	4,6	1993	11	7	1	34,3	-	-
6	83	71	62	66	71	57	135,5	1981	16,9	1992	14	8	2	32,8	-	-
7	85	74	63	67	72	63	176,7	2004	1,8	1994	12	8	2	79,3	-	-
8	88	80	67	74	77	80	180,2	2005	1,2	1996	15	10	3	36,8	-	-
9	89	87	69	80	81	56	129,0	1994	5,3	2002	14	10	1	34,5	-	-
10	88	88	76	83	84	76	183,6	2006	28,8	2010	16	10	2	43,5	-	0
11	88	87	83	85	86	70	160,0	1996	7,1	1993	18	12	2	27,0	2	4
12	88	87	85	86	87	58	111,8	1981	11,4	2002	20	11	1	24,9	8	12
Vuosi/ Year	86	82	72	77	79	655	183,6		0,9		182	111	18	79,3		

Kuva 49. Lumensyvyyden keskimääräiset mittaustulokset mittauspisteeltä Helsinki-Kaisaniemi

Laskentatyökalussa lumensyvyysarvoina on käytetty ilmatieteenlaitoksen julkaisemia tilastoja vuosista 1981–2010, joissa on ollut mukana lumensyvyyden keskiarvot tehdyistä havainnoista kyseisen kuukauden 15. ja viimeisenä päivänä. Lumensyvyys on merkitty nolla, kun kyseessä olevan päivän lumensyvyyden keskiarvo on pienempi kuin 0,5 cm. Sarakkeessa on viiva, kun mittauspaikan ympäristössäkään ei ole ollut lainkaan lunta. [57]

Kuvasta 49 nähdään, että alkutalvella keskimääräinen lumensyvyys on ollut kasvussa, jossain vaiheessa talvea se on pysynyt samana ja laskenut lopputalvella. Tästä johtuen laskelmissa lumen albedo on määritelty kolmella eri arvolla, joten lumensyvyyden kasvuvaiheessa käytettiin tuoreen lumen albedoa, keskivaiheessa pysyvän lumen albedoa ja laskuvaiheessa sulavan lumen albedoa.

Kaikkein tarkin lähestymistapa olisi käyttää lumensyvyyden tunneittain tilastollisia arvoja, mutta ei tästä ole tehty tarkempaa tilastollista tutkintaa. Kahden viikon välein tilastoiduista keskimääräisistä lumensyvyyksistä laskettiin tunnittaisia arvoja interpoloimalla, jolloin saatiin tilastollisesti realistisempia lukuja. Tunneittain laskettuja lumensyvyyskäytkä käytettiin maanpinnan ja ulkoilman välisen energiataseen tutkimisessa, jolloin jokaiselle tunnille laskettiin uudet lämpökonduktanssit kaavoilla (5,6). Tällä tavalla voitiin huomioida tunnittaista lumen eristävää vaikutusta maanpinnan ja ulkoilman energiataseessa.

Maanpinnan ja ulkoilman väliseen energiataseeseen vaikuttaa myös lumen emissiokerroin pitkäaaltoisen nettosäteilyn kautta. Lumen emissiokerroin tarkoittaa lumen kykyä emittoida ja vastaanottaa pitkäaaltoista lämpösäteilyä. Lumen emissiokerroin kasvaa iän mukaan lumen sisällä kertyneiden epäpuhtauksien ansiosta. Kun tuoreella lumella emissiokerroin on 0,82, sulavan lumen emissiokerroin on 0,98. [11][34] Tästä syystä johtuen laskentatyökalussa on käytetty eri emissiokertoimia lumensyvyyden kasvu-, väli- ja laskukaudella.

3.2.2.8. Ympäröivän alueen maanpintatyyppin vaikutus

Lämmöntasaajajärjestelmää ympäröivän alueen maanpintatyyppi määrittää maankamarassa olevan alkuajanhetken lämpötilajakauman. Tutkimustöiden mukaan maankamaran lämpötila määräytyy pääosin maanpinnan vuosittaisen keskilämpötilan mukaan, joka vaihtelee maanpinnantyyppin mukaan, kuten taulukossa 2 on esitetty.

Maankamaran lämpötilajakaumaan vaikuttava toinen suuri tekijä on paikalla esiintyvän maalajin terminen diffusiviteetti, jonka avulla määritetään syvyysulottuvuus. Terminen diffusiviteetti vaihtelee maalajin mukaan. Kuitenkin kalliolla terminen diffusiviteetti on $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, irtomaalajien terminen diffusiviteetti on pienempi kuin kallion. Termisestä diffusiviteetista lasketun syvyysulottuvuuden avulla laskentatyökalu määrittää laskentamallin minimisyvyyden. Syvyysulottuvuuden alapuolella lämpötila maankamarassa on maanpinnan vuosittaisen keskilämpötilan ja geometrisen gradientin säätelemä. Laskentamallin pienennetty versio on esitetty liitteenä kuvassa 61.

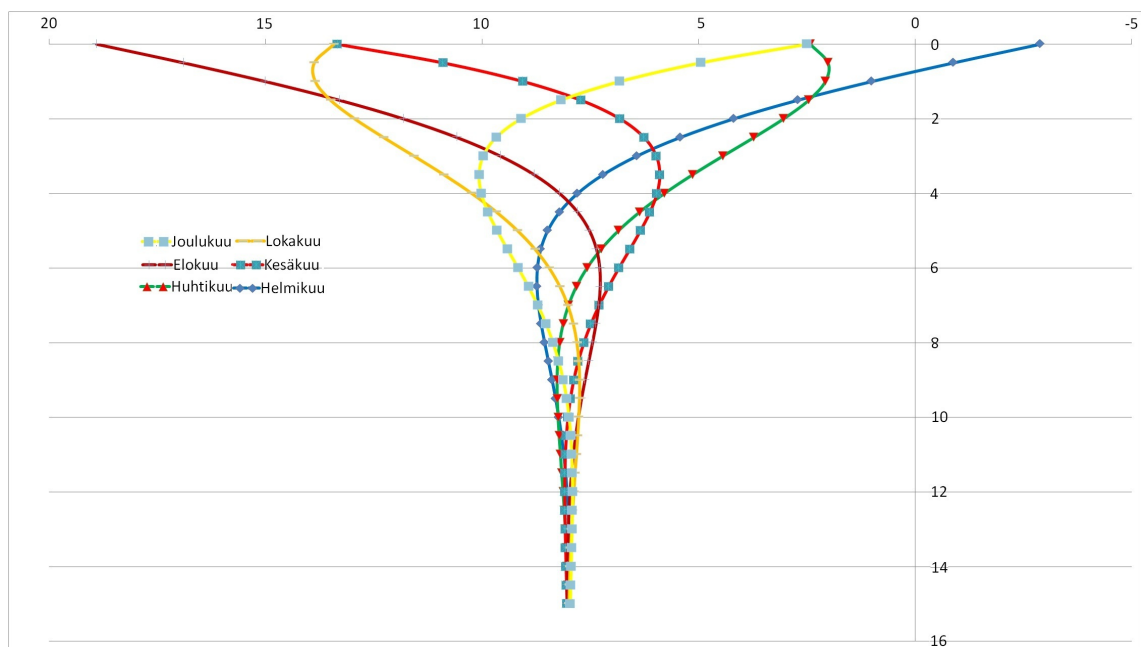
Kuvassa 61 esitetty adiabaattinen alue tarkoittaa, että lämpöä ei siirry adiabaattisella reunalla oleviin solmupisteisiin, eikä poistu niistä. Koska vieressä on olemassa kuitenkin vastaavanlainen maaputkisto, jossa tapahtuu saman verran lämmönsiirtoa. Tästä syystä johtuen viereisen tilan kanssa tapahtuva lämmönsiirto ei olisi aiheuttanut mitään muutoksia laskentamallin energialaskelmissa.

Kuvassa 61 esitetyn laskentamallin solmupisteiden lämpötilat alkuajan hetkellä määritetään kaavalla (2) ja laskentamallin reunaehtoina käytetään lämpövuota, joka liitetään vain reunoissa oleviin solmupisteisiin kaavalla (12). Nämä reunaehtoina käytetyt solmupisteet sijoitetaan mahdollisimman kauas maaputkistosta syvyys- ja leveyssuunnas-

sa, jotta voidaan muodostaa mahdollisimman suuri dynaaminen laskentaympäristö laskentamallin reunan ja maaputkiston välillä. Mitä suurempaa laskentamallia käytetään, sitä todenmukaisempia tuloksia saadaan. Toisaalta liian suuren laskentamallin käyttäminen vaatii lisää solmupisteitä, jotka lisäävät laskentamääriä ja pidentävät laskentaa merkittävästi. Minimivaatimuksena pidetään laskentamallin olevan syvyys, sekä leveyssuunnassa yhtä suuri kuin laskettu syvyysulottuvuus.

3.2.2.9. Asennussyvyyden vaikutus

Maankamaran lämpötila määräytyy pääosin maanpinnan vuosittaisen keskilämpötilan mukaan. Maanpinnan lämpötilamuutokset siirtyvät alaspäin maa- sekä kallioperään ja muodostavat lämpötila-syvyysjakaumia maankamarassa. Kuvassa 50 esitetään teoreettiset lämpötila-syvyyskäyrät joka toiselle kuukaudelle, kun maanlajina on moreeni ja terminen diffusiviteetti on $7,22 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Käyrien tekemiseen käytetty maanpinnantyyppi on nurmikko, jolloin maanpinnan keskilämpötilaksi oletetaan $8 \text{ }^\circ\text{C}$. Ulkoilman vaihtelun amplitudi antaa meille myös maanpinnan lämpötilanvaihtelun amplitudin, jolloin saadaan laskettua amplitudiksi $10,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Tällöin voidaan määrittää alkuaianhetken lämpötila-syvyysjakaumia.



Kuva 50. Teoreettiset lämpötila-syvyyskäyrät joka toiselle kuukaudelle

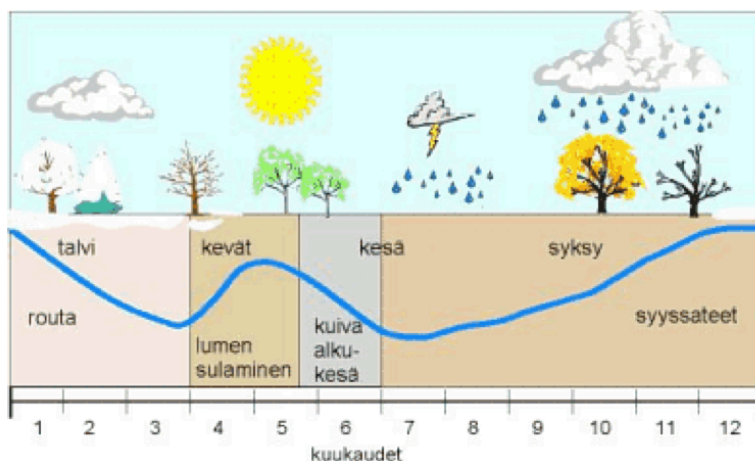
Kuvassa 50 huomataan, että kesällä maan lämpötila laskee syvyysuunnassa alaspäin, kun talvella maan lämpötila nousee syvyysuunnassa taas alaspäin. Mitä syvimmälle

maaputkisto asennetaan, sitä enemmän jäähdytys- ja lämmitysenergiaa saadaan hyödynnettyä.

3.2.2.10. Pohjaveden vaikutus

Sadevedet ja lumien sulamisvedet varastoituvat maa- sekä kallioperään ja muodostavat joko maavettä tai pohjavettä. Maavesi täyttää maanpinnan ja pohjaveden pinnan välisessä vyöhykkeessä maaperän huokostilat ja kallioperän hiushalkeamat vain osittain, kun taas pohjavesi täyttää maaperään kokonaan pohjavedenpinnan alapuolella. Pohjaveden alapuolella vesi virtaa maaston alimpien kohtien suuntaan painovoiman vaikutuksesta ja purkautuu paikoin maanpintaan tai vesistöihin.

Pohjaveden pinta on Suomessa yleensä 1-4 metrin syvyydessä. Lisäksi pohjavesi voi esiintyä harjuissa ja kallioperässä jopa 20 metrin syvyydessä. Pohjaveden pinta laskee talvella routimisen myötä ja alkaa nousta keväällä kun lumet ja routa ovat sulaneet. Pohjaveden pinta laskee taas kesällä vähäsateisuuden seurauksena ja alkaa nousta heinäkuun sateiden myötä. Lopulta syysateet täydentävät pohjavesivarastot. Kuvassa 51 esitetään pohjavedenpinnan vuotuiset korkeusvaihtelut. Pohjaveden pinnan vuotuiset korkeusvaihtelut ovat yleensä 0,1- 1,0 metriä, mutta voivat poikkeustapauksissa olla useitakin metrejä. [58]



Kuva 51. Pohjaveden pinnan normaali vuodenaikainen vaihtelu

Pohjavesi virtaa maakamarassa ruhjeiden, siirrosten ja rakojen muodostamissa tiloissa ja virtausnopeuteen vaikuttaa sadannan lisäksi maaperän raekoko. Hienoissa maalajeissa, kuten savessa tai savimoreenissa, virtausnopeus on hyvin pieni pienimmän raekoon vuoksi. Karkeaa ainesta sisältävissä moreeneissa, kuten hiekkamoreeneissa, virtausno-

peus on noin 0,1 - 0,5 metriä vuorokaudessa, hiekassa noin 0,5 - 5 metriä vuorokaudessa ja hyvin karkeassa aineksessa jopa 20 - 50 metriä vuorokaudessa.

Eri puolilla Suomea noin 80 asemalla pohjavesiasemilla seurataan pohjaveden pinnan korkeutta ja syvyyttä, laatua ja lämpötilaa. Asemien havainnot tallennetaan Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämään pohjavesirekisteriin (POVET). [59] Järjestelmään tallennettujen tilastojen mukaan esim. Espoon kaupungin Brinkinmäki alueen pohjavedenhavaintoputkien keskimääräinen lämpötila oli 8,8 °C heinäkuussa ja 5,6 °C tammikuussa. Espoon kaupungin Metsämaa alueen pohjaveden havaintoputkien keskimääräinen lämpötila oli 9,4 °C heinäkuussa ja 7,7 °C tammikuussa. Tämä määrä Puolarmetsän alueella oli 6,9 °C marraskuussa. [60]

Nina Leppäharju Oulun Yliopistosta on tehnyt lukuisia mittauksia Espoon kaupungin omistamissa pohjavedenhavaintoputkissa hänen pro gradutyötään varten. Tutkimustyön tarkoituksena oli selvittää maanpinnan keskilämpötilan riippuvuutta maanpinnan tyypistä ja kehittää teoreettinen laskentamalli muodostamaan lämpötila-syvyys käyrä. Mittausalueena on ollut Otaniemi-Tapiola-Matinkylä-linja. Tutkimustyössä lämpötilat mitattiin havaintoputkien pohjalle asti jokaisessa tasametrissä. Otaniemen pohjavedenhavaintoputki sijaitsi maanpintatyypiltään nurmikolla ja pohjaveden pinnankorkeus oli noin 3 metriä maanpinnan alla. Otaniemestä ja muilta alueilta saatujen mittaustulosten perusteella kävi ilmi, että mitatut lämpötila-syvyys-käyrät vastaavat muodoltaan kohtalaisen hyvin kuvan 50 teoreettista lämpötila-syvyys-käyrää. [23]

Jos ko. rakennettavalla alueella merkittävä määrä virtaava pohjavettä, laskentatyökalulla on mahdollisuus huomioida pohjaveden vaikutus ja syöttää laskentaan pohjaveden vuotuinen keskimääräinen pinnankorkeus. Jos valitaan, että alueella on pohjavettä ja annetaan pohjaveden pinnankorkeus, silloin laskentatyökalu muuttaa laskentamallin kokoa jolloin kuvassa 61 esitetyn laskentamallin syvyys tulee olemaan yhtä paljon kuin ilmoitettu pohjaveden pinnankorkeus. Lisäksi laskentamallin pohjaan määriteltä reunaehto voidaan olettaa stationääriseksi. Pohjaan lyödyt lämpötilat pysyvät joka tunnin ajan samana, mutta muuttuvat tunnin lopussa syvyyden ja ajanhetken mukaisesti kuten on laskettu kaavalla (2). Tämä laskentatilanne on voimassa vain silloin kun rakennettavan alueen maankamara sisältää karkeita tai hyvin karkeita aineksia, jolloin pohjavesi virtaa

mahdollisimman suurella nopeudella ja vie liiallista lämpöä pois kesällä tai tuo ympäristöön tarvittavaa lämpöä talvella. Jos laskentatyökalussa ei määritellä pohjaveden tietoa, ohjelma jättää pohjaveden vaikutuksen huomioimatta ja olettaa koko laskentamallissa tapahtuvan lämmönsiirron olevan dynaaminen.

3.2.2.11. Järjestelmän automatiikan vaikutus

Lämmöntasaajajärjestelmässä asianmukaisesti toimivalla automatikalla on tärkeä tehtävä, koska aikaisemmin tehdyissä tutkimuksissa kävi ilmi, että järjestelmän 24/7 ympäri vuoden käyttö on tuottanut negatiivisia tuloksia. Ongelma on vallitseva varsinkin syys- ja kevätkaudella, koska maaperässä on terminen muisti, joka johtuu aiempien päivien ja tuntien aikana uutetusta ja evakuoidusta lämmöstä. [18] Joten järjestelmä vaatii asianmukainen ohitustoiminta, jotta vältetään järjestelmän ilman hyödytöntä lämpenemistä, kun kylmä ilma on tarpeen tai päinvastoin. Diplomityön kirjallisuusosassa kerrottiin, että on ollut lukuisia todisteita, joissa maaperän lämmitys- ja jäähdytyskapasiteetti on vähentynyt paljon riippuen useista tekijöistä, kuten maaperän termisistä ominaisuuksista, virtausnopeuksista putkistoissa, pitkistä kylmäjaksoista jne. Tästä syystä esimerkiksi kesällä voi olla hyödyllisempi pysäyttää lämmöntasaajajärjestelmä yöllä ja imeä ilmaa suoraan ulkoa, jos se on viileämpää.

Lämmöntasaajajärjestelmän automatiikan on oltava yhteydessä myös ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton kanssa. Voi myös olla hyödyllisempi pysäyttää lämmöntasaajajärjestelmä ja imeä ilmaa suoraan ulkoa, kun ulkoilman lämpötila saavuttaa sellaisen rajalämpötilan, jonka jälkeen ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenottoyksikkö pystyy lämmittämään tuloilmaa toivottuun lämpötilaan ilman jälkilämmityspatterin toimintaa. Esimerkkikohteen RIUSKA:lla tehtyjen laskelmien ja oletusten mukaan, lämmityskaudella poistoilman lämpötila on 21 °C, toivottu tuloilman lämpötila 20 °C, lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhde on 80 % ja tulopuolen puhaltimen lämmittävä osuus on 1 °C. Tämä tarkoittaa, että lämmöntalteenoton jälkeen tuloilman lämpötila on 19 °C. Lämpötilahyötysuhteen, poistoilman ja tuloilman lämpötilojen avulla voidaan laskea rajalämpötila, jonka jälkeen voi pysäyttää lämmöntasaajajärjestelmän.

$$n_T = \frac{T_{tulo} - T_{ulko}}{T_{poisto} - T_{ulko}} \quad (59)$$

Kaavalla (59) lasketaan ulkoilman rajalämpötilaksi 11°C. Laskentatyökalu laskee tätä rajalämpötilaa, eikä reagoi ennen kuin ulkoilman lämpötila saavuttaa jäähdytyskauden rajalämpötilan. Laskentatyökalulla voidaan määrittää jäähdytyskauden rajalämpötila, jonka jälkeen lämmöntasaajajärjestelmä alkaa toimia uudestaan. Esimerkkikohteen jäähdytyskauden rajalämpötilaksi valittiin 19°C. Tämä tulkitsee, että lämmöntasaajajärjestelmä ei ole käytössä kun ulkoilman lämpötila on 11–19°C välillä. Näiden automaattikatoimintojen tavoitteena on hyödyntää maaperän lämmitys- ja jäähdytysenergiaa mahdollisimman tehokkaasti.

4. Tapaustutkimukset

Laskentatyökalulla voidaan laskea lämmöntasaajajärjestelmällä saavutettu lämmitys-/jäähdytysenergia sekä seurata järjestelmän aiheuttamia muutoksia tuloilman lämpötilassa. Lisäksi vaihtamalla laskennan lähtötietoja voidaan tutkia erilaisten tekijöiden vaikutusta tuloksiin vertailemalla niitä Excel ohjelman kaavioiden avulla.

Laskentatyökalun käyttöliittymässä voidaan valita lähtötietoja luetteloruudulla, jotka ovat värjätty keltaisella kuvassa 52. Siten valitun lähtötiedon arvot täyttyvät automaattisesti soluihin, jotka ovat värjätty oranssinvärisenä samassa kuvassa. Myös käyttöliittymässä ruskeanvärisenä värjätyt solut on täytettävä manuaalisesti. Samassa kuvassa esitetty komentopainikkeen LASKE tehtävänä on käynnistää Visual Basic ohjelma, joka ohjaa laskenta-askeleita ja tallentaa lopullisia tuloksia.

Laadittu laskentatyökalu tekee erittäin tarkkoja laskelmia joka 15 minuuttina ja ottaa huomioon monenlaisia vaihtelevia tai ei vaihtelevia tekijöitä. Näin ollen yksi laskentaprosessi kestää tehokkaalla tietokoneella keskimäärin 5 tuntia. Laskentaprosessin jälkeen ohjelma tallentaa lopullisia tuloksia kuvassa 52 näkyviin violetinvärisiin soluihin.

Laskelmissa oletettiin maaperän koostuvan 2,5 metrin syvyyteen asti hiekkamoreenista ja siitä alaspäin graniitista. Maalajien termiset ominaisuudet ovat esitetty kuvassa 52. Maanpeitteeksi oletettiin ruoho, joka vaikuttaa maanpinnan ja ulkoilman väliseen säteilytalouteen.

Ylin kerros:		Lämmönsiirtoputken tiedot:	
Moreeni *		Putkikoko	200x7
Lämmönjohtavuus, k (W/mK)	2	Ulkohalkaisija, D_u (m)	0,2
Ominaislämpökapasiteetti, c (J/m ³ K)	2,77E+06	Sisähalkaisija, D_s (m)	0,186
Terminen diffusiviteetti, s (m ² /s)	7,22E-07	Putkien välinen etäisyys, (m)	1
Maakerroksen syvyys, e (m)	0,1	Putkipituus, L (m)	50
Välikerros:		Putkien määrä	30
Moreeni *		Asennussyvyys, x (m)	2
Lämmönjohtavuus, k (W/mK)	2	Jakoputken tiedot:	
Ominaislämpökapasiteetti, c (J/m ³ K)	2,77E+06	Putkikoko	1000x74,5
Terminen diffusiviteetti, s (m ² /s)	7,22E-07	Ulkohalkaisija, D_u (m)	1
Maakerroksen syvyys, d (m)	1,24	Sisähalkaisija, D_s (m)	0,851
Maaputkiston asennuskerros:		Automaation ja LTO:n arvot:	
Moreeni *		Poistoilman lämpötila	21
Lämmönjohtavuus, k (W/mK)	2	Tuloilman lämpötila	19
Ominaislämpökapasiteetti, c (J/m ³ K)	2,77E+06	LTO:n hyötysuhde	0,8
Terminen diffusiviteetti, s (m ² /s)	7,22E-07	Raitisilman lämpötila	11
Pohjakerros:		Jäähdytyksen rajalämpötila	19
Graniitti ****		<input type="checkbox"/> Pohjavesi	
Lämmönjohtavuus, k (W/mK)	3,55	Pohjaveden syvyys (m)	5
Ominaislämpökapasiteetti, c (J/m ³ K)	2,23E+06	Pohjaveden lämpötila (°C)	6
Terminen diffusiviteetti, s (m ² /s)	1,59E-06	LASKE	
Pohjakerroksen syvyys, z (m)	2,5	Kokonaisjäähdytysenergia (MWh)	0,00
Maanpeitteen tiedot:		Hyödytön Jäähdytysenergia (MWh)	0,00
Ruoho		Jäähdytysenergia (MWh)	0,00
Albedo, α	0,25	Kokonaislämmitysenergia (MWh)	0,00
Pitkääalt.Emissiviteetti, ϵ	0,981	Hyödytön Lämmitysenergia (MWh)	0,00
Keskimääräisen tasainen		Lämmitysenergia (MWh)	0,00
Maanpeitteen karheuskerroin, R_f	1,13	IV.Puhaltimen kokonaishyötysuhde	0,66
Alueen maanpinnan tiedot:		Puhallinenergian lisäys (MWh)	0,00
Nurmikko		Järjestelmän käyttöaika (h)	0,00
Maanpinnan keskilämpötila [°C]	8		

Kuva 52. Tapaustutkimuksissa käytetyt lähtötiedot ja laskentatyökalun käyttöliittymä

Laskelmissa maanpinnan karheus vaikuttaa maanlämpötilaprofiiliin konvektion kautta ja karheudeksi oletettiin keskimääräisen tasainen. Diplomityön osassa 2.1.7 kerrottiin, että haaroitetussa asennuksessa lämmönsiirtoputkien keskipisteiden välisen etäisyyden on oltava ainakin 1 metri. Laskelmissakin oletetaan sen olevan 1 metri ja haluttaessa voidaan kokeilla eri etäisyyksiä.

Lämmönsiirtoputkien määräksi oletettiin 30, niin että pidetään ilmavirran maksimi nopeutena putkessa 3 m/s. Laskelmissa käytetyistä tunneittain vaihtelevista ilmamääristä on ollut maksimissaan 3,05 kg/s ja tämä johtaa 2,965 m/s nopeuteen käytettäessä pie-

nempää putkikokoa. Lisäksi jakoputkessa ilmavirran nopeudeksi pyrittiin alle 6 m/s ja tästä syystä käytettiin mahdollisimman suuri putkikoko painehäviötä minimoimiseksi.

Laskentatyökalu käyttää ympäristöministeriön julkaisemaan testivuoden TRY2012 ilmoittamaa tunnitaisia tilastollisia arvoja, kuten ulkoilman lämpötilaa, tuulen nopeutta ja kokonaissäteilyä. Lumen vaikutuksen huomioon ottamiseen on käytetty ilmatieteenlaitoksen julkaisemia lumitilastoja vuosista 1981–2010.

Laskelmissa käytetyt tunneittain vaihtelevat ilmamäärät saatiin suoraan RIUSKA ohjelmassa ilmoitetuista arvoista, koska sekin on dynaaminen laskentatyökalu ja sillä tehdyissä laskelmissa on otettu huomioon myös tilojen jäähdytyskuormat.

Laskentatuloksissa jäähdytysenergia tarkoittaa toivotun mukavuuden saavuttamiseen maaperän käytettyä energiaa jäähdytettäessä tuloilmaa. Hyödytön jäähdytysenergia tarkoittaa maaperän tuloilman jäähdyttämiseen kuluttamaa energiaa, jolloin maaperän tuloilman lämmittäminen oli toivottua toimintaa. Eli se on hukkaan mennyttä jäähdytysenergiaa.

Laskentatuloksissa lämmitysenergia tarkoittaa maaperästä saatavaa, tuloilman lämmittämiseen käytettävää energiaa. Myös hyödytön lämmitysenergia tarkoittaa maaperän tuloilmaa lämmittämiseen kuluttamaa energiaa, jolloin maaperän tuloilmaa jäähdyttämisen oli toivottu toiminta. Eli se on hukkaan mennyttä lämmitysenergiaa. Puhallinenergian lisäys tarkoittaa lämmöntasaajajärjestelmän tuottaman painehäviön kompensoimiseen käytettyä puhaltimen sähköenergiaa.

4.1. Asennussyvyyden vaikutus eri putkipituuksilla

Tämän tapaustutkimusryhmän tavoitteena oli tutkia eri asennussyvyyksien vaikutuksia tuloksiin. Laskelmissa asennussyvyyksinä on käytetty 2 ja 2,5 metriä, putkikokona Ø200x7 mm ja asennuspituutena joka viides metri 0 - 50 metrin välillä. Laskentojen seurauksena saadut tulokset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Lämmöntasaajajärjestelmän asennussyvyyden vaikutukset energiatuloksiin.

Putkipituus [m]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
x (Asennussyvyys) =2 m. Putkikoko Ø 200x7 mm.											
Q _{jääh.} [MWh]	0	-3,71	-4,12	-4,39	-4,58	-4,70	-4,80	-4,87	-4,92	-4,96	-4,99
Q _{hyödytön jääh.} [MWh]	0	-4,82	-3,49	-2,94	-2,71	-2,60	-2,54	-2,51	-2,49	-2,48	-2,47
Q _{läm.} [MWh]	0	6,17	8,01	9,38	10,38	11,11	11,63	12,03	12,33	12,57	12,77
Q _{hyödytön läm.} [MWh]	0	0,10	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Q _{puhallin lisäys} [MWh]	0	0,450	0,468	0,486	0,505	0,523	0,542	0,56	0,579	0,597	0,615
x (Asennussyvyys) =2,5 m. Putkikoko Ø200x7 mm.											
Q _{jääh.} [MWh]	0	-3,95	-4,52	-4,91	-5,17	-5,35	-5,49	-5,59	-5,67	-5,73	-5,78
Q _{hyödytön jääh.} [MWh]	0	-4,50	-3,11	-2,57	-2,33	-2,22	-2,17	-2,14	-2,12	-2,11	-2,11
Q _{läm.} [MWh]	0	6,57	8,71	10,30	11,41	12,20	12,78	13,21	13,54	13,81	14,02
Q _{hyödytön läm.} [MWh]	0	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Q _{puhallin lisäys} [MWh]	0	0,451	0,469	0,488	0,506	0,524	0,543	0,561	0,580	0,598	0,617

4.2. Putkikoon vaikutus eri putkipituuksilla

Tämän tapaustutkimusryhmän tavoitteena oli tutkia erilaisten putkikokojen vaikutuksia tuloksiin. Laskelmissa asennussyvyudeksi on käytetty 2,5 metri, putkikooksi Ø 200x7 mm, Ø 250x8,8 mm ja Ø 315x11,1, myös asennuspituudeksi joka viides metri 0 - 50 metrin välillä. Laskentojen seurauksena saadut tulokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Lämmöntasaajajärjestelmän putkikokojen vaikutukset energiatuloksiin.

Putkipituus [m]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
x (Asennussyvyys) =2,5 m. Putkikoko Ø 200x7 mm.											
Q _{jääh.} [MWh]	0	-3,95	-4,52	-4,91	-5,17	-5,35	-5,49	-5,59	-5,67	-5,73	-5,78
Q _{hyödytön jääh.} [MWh]	0	-4,50	-3,11	-2,57	-2,33	-2,22	-2,17	-2,14	-2,12	-2,11	-2,11
Q _{läm.} [MWh]	0	6,57	8,71	10,30	11,41	12,20	12,78	13,21	13,54	13,81	14,02
Q _{hyödytön läm.} [MWh]	0	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Q _{puhallin lisäys} [MWh]	0	0,451	0,469	0,488	0,506	0,524	0,543	0,561	0,580	0,598	0,617
x (Asennussyvyys) =2,5 m. Putkikoko Ø 250x8,8 mm.											
Q _{jääh.} [MWh]	0	-4,01	-4,66	-5,12	-5,45	-5,69	-5,87	-6,01	-6,12	-6,21	-6,28
Q _{hyödytön jääh.} [MWh]	0	-4,72	-3,31	-2,73	-2,48	-2,36	-2,30	-2,27	-2,26	-2,25	-2,25
Q _{läm.} [MWh]	0	6,52	8,75	10,51	11,81	12,77	13,49	14,03	14,46	14,79	15,06
Q _{hyödytön läm.} [MWh]	0	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Q _{puhallin lisäys} [MWh]	0	0,385	0,392	0,398	0,404	0,411	0,417	0,424	0,430	0,436	0,443
x (Asennussyvyys) =2,5 m. Putkikoko Ø 315x11,1 mm.											
Q _{jääh.} [MWh]	0	-4,03	-4,74	-5,27	-5,66	-5,96	-6,19	-6,38	-6,53	-6,65	-6,75
Q _{hyödytön jääh.} [MWh]	0	-4,97	-3,54	-2,91	-2,63	-2,49	-2,43	-2,40	-2,39	-2,38	-2,38
Q _{läm.} [MWh]	0	6,42	8,66	10,53	12,00	13,12	13,99	14,66	15,19	15,62	15,97
Q _{hyödytön läm.} [MWh]	0	0,09	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Q _{puhallin lisäys} [MWh]	0	0,359	0,361	0,363	0,365	0,367	0,369	0,371	0,374	0,376	0,378

4.3. Pohjaveden vaikutus eri putkipituuksilla

Tämän tapaustutkimusryhmän tavoitteena oli tutkia pohjaveden syvyyden vaikutusta tuloksiin. Laskelmissa pohjaveden pinnankorkeudeksi on käytetty 5, 4 ja 3 metriä maanpinnan alla, putkikooksi Ø 250x8,8 mm, myös maaputkiston asennussyvyudeksi 2,5 m. Laskentojen seurauksena saadut tulokset on esitetty taulukossa 9. Pohjaveden vuotuisen keskimääräisen syvyyden mukaan laskentamallin pohjaan syötetyt lämpötilat vaihtelevat jopa tunneittain laskelmien etenemisessä, kuten diplomityön kohdalla 3.2.2.10.

Taulukko 9. Pohjaveden syvyyden vaikutukset energiatuloksiin

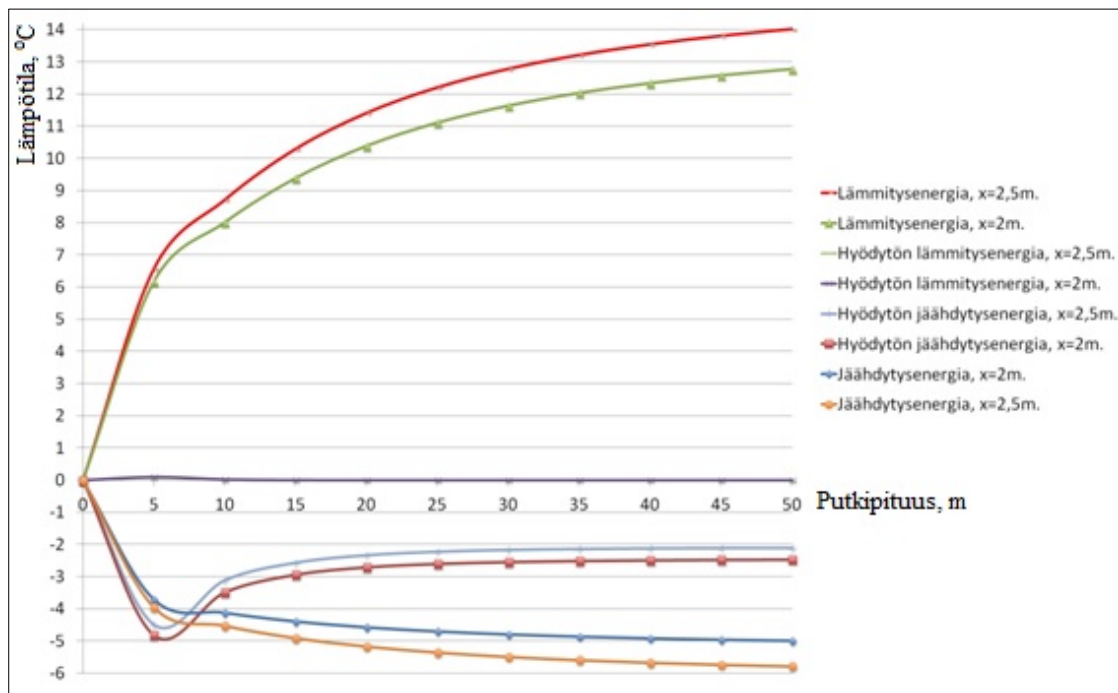
Putkipituus [m]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
x (Asennussyvyys) =2,5 m. Putkikoko Ø 250x8,8 mm. Pohjaveden syvyys 5 m.											
Q _{jääh.} [MWh]	0	-4,08	-4,8	-5,3	-5,66	-5,92	-6,12	-6,28	-6,4	-6,5	-6,58
Q _{hyödytön jääh.} [MWh]	0	-4,52	-3,03	-2,41	-2,11	-1,96	-1,87	-1,82	-1,79	-1,78	-1,77
Q _{läm.} [MWh]	0	6,66	9,02	10,85	12,2	13,17	13,89	14,44	14,87	15,21	15,48
Q _{hyödytön läm.} [MWh]	0	0,07	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
Q _{puhallin lisäys} [MWh]	0	0,385	0,392	0,398	0,404	0,411	0,417	0,424	0,43	0,436	0,443
x (Asennussyvyys) =2,5 m. Putkikoko Ø 250x8,8 mm. Pohjaveden syvyys 4 m.											
Q _{jääh.} [MWh]	0	-4,2	-5,01	-5,58	-5,99	-6,29	-6,53	-6,7	-6,85	-6,96	-7,06
Q _{hyödytön jääh.} [MWh]	0	-4,42	-2,93	-2,33	-2,03	-1,87	-1,78	-1,73	-1,7	-1,68	-1,67
Q _{läm.} [MWh]	0	6,84	9,37	11,32	12,73	13,75	14,49	15,06	15,49	15,84	16,12
Q _{hyödytön läm.} [MWh]	0	0,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q _{puhallin lisäys} [MWh]	0	0,385	0,392	0,398	0,404	0,411	0,417	0,424	0,43	0,436	0,443
x (Asennussyvyys) =2,5 m. Putkikoko Ø 250x8,8 mm. Pohjaveden syvyys 3 m.											
Q _{jääh.} [MWh]	0	-4,43	-5,45	-6,17	-6,69	-7,08	-7,38	-7,62	-7,8	-7,95	-8,08
Q _{hyödytön jääh.} [MWh]	0	-4,24	-2,81	-2,27	-2,02	-1,89	-1,82	-1,78	-1,77	-1,76	-1,76
Q _{läm.} [MWh]	0	7,35	10,36	12,65	14,27	15,43	16,28	16,92	17,41	17,8	18,11
Q _{hyödytön läm.} [MWh]	0	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q _{puhallin lisäys} [MWh]	0	0,385	0,39	0,398	0,404	0,411	0,417	0,424	0,43	0,436	0,443

5. Tutkimustulosten tarkastelu

Laskentatyökalulla tehtyjen laskelmien perusteella kävi ilmi, että lämmöntasaajajärjestelmä on ollut käytössä vain 2562 tuntia vuodesta. Syynä oli laskelmissa käytetyt nolla ilmamäärät ja järjestelmän automatiikka. Koska laskelmissa on käytetty esimerkkikohteeseen aikaisemmin RIUSKA ohjelmalla määriteltäviä tunnitaisia ilmamääriä. RIUSKA:lla määriteltujen ilmamäärien mukaan, ilmanvaihtojärjestelmä on ollut käytössä vain 4243 tuntia vuodessa, mikä johtuu siitä, että toimistorakennuksessa ilmanvaihto on ollut päällä arkisin vain 11 tuntia koko vuoden aikana ja sen lisäksi jäähdytyskaudella yötuuletus on oletettu olevan käytössä.

Laskentatyökalu olettaa lämmöntasaajajärjestelmän olevan integroituna ilmanvaihdon lämmöntalteenottoyksikön kanssa. Koska kirjallisuuskatsauksessa selvisi, että järjestelmän 24/7 käyttö on tuottanut negatiivisia tuloksia merkittävästi ja maaperän rajallinen lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeton käyttö on johtanut lämmityskaudella viileän ilman jäähtymiseen sekä jäähdytyskaudella lämpimän ilman enemmän lämpenemiseen. Joten lämmityskaudella lämmöntasaajajärjestelmän pysäyttäminen ja tuloilman imu ulkoa suoraan on järkevää, jolloin ainoastaan lämmöntalteenottoyksiköllä pystytään nostamaan tuloilman lämpötilaa toivottuun lämpötilaan ilman erillistä lämmitystoimintaa. Tästä syystä laskentatyökalu tulkitsee, että lämmöntasaajajärjestelmä ei ole käytössä kun ulkoilman lämpötila on 11–19°C välillä.

Ensimmäisellä tapaustutkimusryhmällä seurattiin maaputkiston asennussyvyyden vaikutusta lämmitys- ja jäähdytysenergiaan 0:sta 50:een metriin jokaisella viidennellä metrillä putkipituuksia. Tapaustutkimuksia on ollut yhteensä 20 kappaletta, joissa asennussyvyytenä on ollut 2 ja 2,5 metriä ja putkikokona Ø 200x7 mm. Laskentojen seurauksena saadut tulokset on esitetty Excel-kaavioilla kuvassa 53.



Kuva 53. Lämmöntasaajajärjestelmän asennussyvyyden vaikutukset energiatuloksiin.

Lämmöntasaajajärjestelmän asentaminen syvemmälle on tuottanut selvästi positiivisia tuloksia lämmitys- ja jäähdytysenergiassa. Syvemmälle asentamisen seurauksena hyödytön lämmitysenergia on vähentynyt. Hyödytöntä lämmitysenergiaa on ollut kuitenkin kummallakin syvyydellä hyvin vähän putkipituuksilla 5 ja 10 m. Järjestelmässä ei ole havaittu hyödytöntä lämmitysenergiaa 10 metrin jälkeen kummallakaan syvyydellä. Eli 10 metriä pidemmillä putkipituuksilla ei ole tapahtunut hyödytöntä lämpenemistä tuloilmassa jäähdytyskauden aikana.

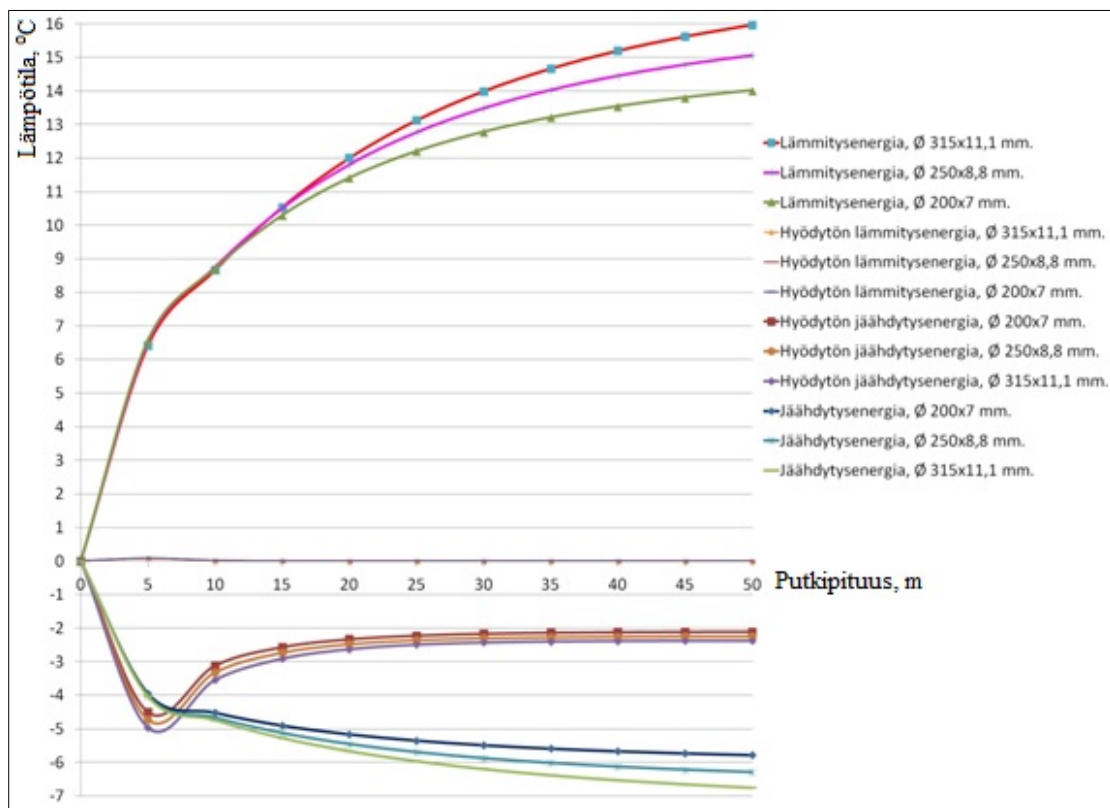
Hyödytöntä jäähdytystä on ollut ainoastaan lopputalvella ja keväällä, jolloin oli tarpeen lämmittää tuloilmaa. Maaputkiston syvemmälle asentamisen seurauksena maaperän aiheuttama tuloilman turhajäähdyttäminen on vähentynyt. Mutta kaikilla putkipituuksilla ja asennussyvyyksillä hyödytön jäähdytys ei kadonnut kokonaan. Tämä tilanne johtuu siitä, että lopputalvella ja keväällä maaperän lämmitysenergia vähenee niin paljon ettei kykene enää lämmittämään tuloilmaa.

Maaputkiston syvemmälle asentamisesta syntyy hieman lisää kitkapainehäviöitä, jotka aiheutuvat virtauspituuden lisääntymisestä. Kahden eri syvyyteen asennetun lämmöntasaajajärjestelmän energiatulosten väliset erotukset on listattu taulukossa 10 näin:

Taulukko 10. Kahteen eri syvyyteen asennetun lämmöntasaajien energiatulosten erotukset

L (Putkipituus)[m]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\Delta Q_{\text{jääh.}} [\text{MWh}]$	0	-0,24	-0,4	-0,51	-0,59	-0,65	-0,69	-0,72	-0,75	-0,77	-0,79
$\Delta Q_{\text{hyödytön jääh.}} [\text{MWh}]$	0	0,32	0,38	0,37	0,37	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,36
$\Delta Q_{\text{läm.}} [\text{MWh}]$	0	0,4	0,7	0,91	1,03	1,1	1,15	1,19	1,21	1,23	1,25
$\Delta Q_{\text{hyödytön läm.}} [\text{MWh}]$	0	-0,02	-0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta Q_{\text{puhallin lisäys}} [\text{MWh}]$	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Toisella tapaustutkimusryhmällä seurattiin putkikoon vaikutusta lämmitys- ja jäähdytysenergiaan 0:sta 50:een metriin, joka viidennellä putkimetrillä. Tapaustutkimuksia on ollut yhteensä 30 kappaletta, joissa asennussyvyytenä on käytetty 2,5 m ja putkikokoina Ø 200x7 mm, Ø 250x8,8 mm ja Ø 315x11,1 mm. Laskentojen seurauksena saadut tulokset on esitetty Excel-kaavioilla kuvassa 54.



Kuva 54. Lämmöntasaajajärjestelmän putkikokojen vaikutukset energiatuloksiin.

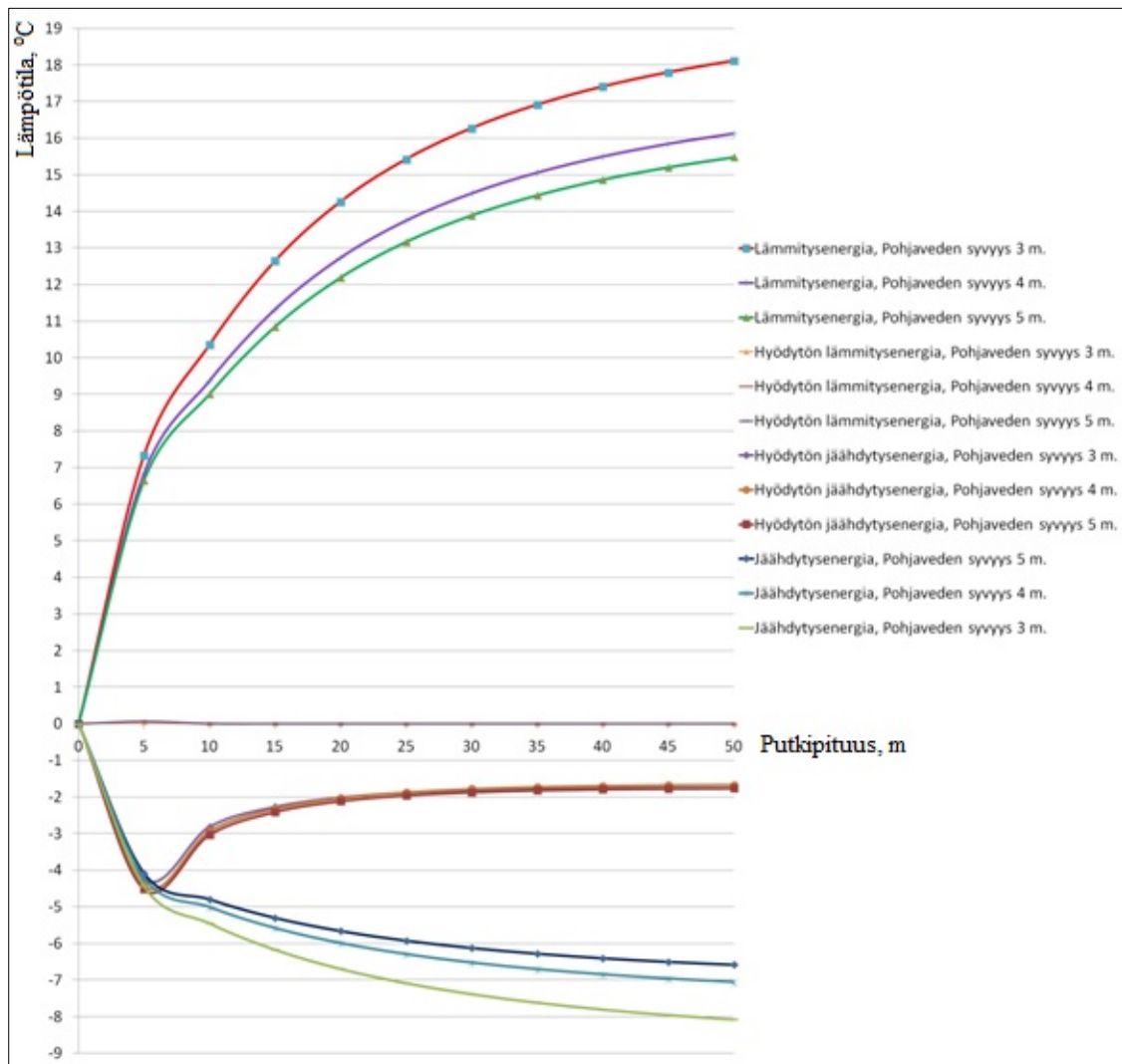
Suurempien putkikokojen käyttäminen on aiheuttanut pienempiä virtausnopeuksia, mutta silti virtausprofiili on jäänyt turbulenttiselle alueelle. Putkikoon suurentaminen on tuottanut selvästi positiivisempia tuloksia lämmitys- ja jäähdytysenergiassa. Toisaalta

putkikoon suurentaminen on johtanut suurempaa lämmönsiirtoa putken sisällä virtaavaa yksikköä kohti ja maaperän lämmityskyky on laskenut nopeammin. Tämän seurauksena hyödytön lämmitys ja jäähdytys on lisääntynyt jonkun verran, kuten on esitetty taulukossa 8.

10 metriä pidemmällä putkipituuksilla tuloilmassa ei ole havaittu hyödytöntä lämpenemistä jäähdytyskaudella. Maaputkiston pituuden suurentamisen seurauksena hyödytön jäähdytys eli maaperän tuloilman turha jäähdyttäminen on vähentynyt. Suuremman putkikoon käytön seurauksena virtausnopeus on laskenut ja sen johdosta kokonaispainehäviökin on laskenut, joka on käyttökustannusten kannalta toivottu tilanne.

Viimeisellä tapaustutkimusryhmällä seurattiin pohjaveden vaikutusta lämmitys- ja jäähdytysenergiaan 0:sta 50:een metriin joka viidennellä putkimetrillä. Tapaustutkimuksia on ollut yhteensä 30 kappaletta, joissa pohjaveden pinnankorkeutena on käytetty 3, 4 ja 5 metriä maanpinnan alla, asennussyvyytinä 2,5 m ja putkikokona Ø 250x8,8 mm. Laskentojen seurauksena saadut tulokset on esitetty Excel-kaavioilla kuvassa 55.

Maan alla virtaava pohjavesi vie liiallista lämpöä jäähdytyskaudella ja tuo ympäristöön tarvittavaa lämpöä lämmityskaudella. Pohjavesi korvaa jäähdytysenergiaa nopeammin jäähdytyskaudella kun lämmöntasaaja luovuttaa tuloilman liiallista lämpöä maaperään ja vastaavasti korvaa lämmitysenergiaa nopeammin lämmityskaudella kun lämmöntasaaja ottaa tarvitsemansa lämpöä maaperästä.



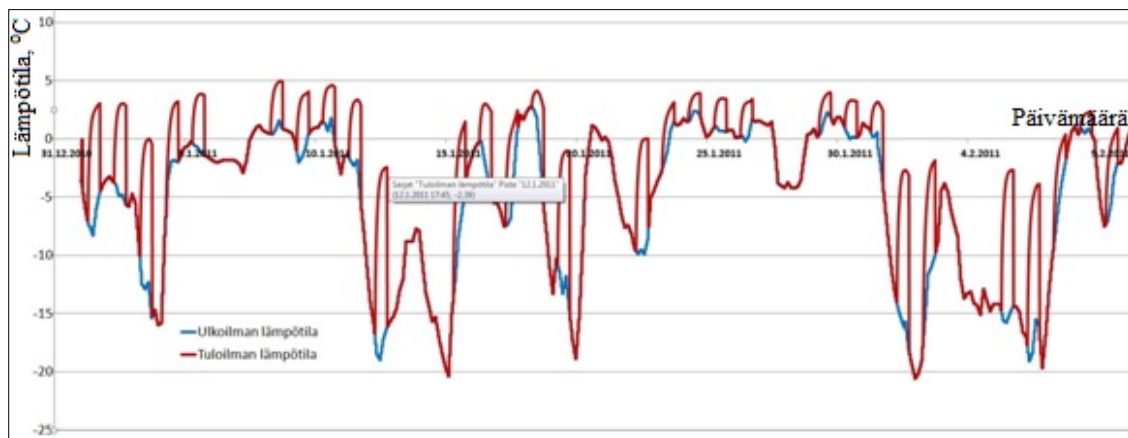
Kuva 55. Pohjaveden syvyyden vaikutukset energiatuloksiin

Tapaustutkimusten tuloksena selvisi, että virtaavan pohjaveden läsnäolo maaperässä tuottaa selvästi positiivisia tuloksia lämmitys- ja jäähdytysenergiassa. Mitä lähempänä maaputkistoa löytyy pohjavettä, sitä enemmän lämmitys- ja jäähdytysenergiaa lämmöntasaaja tuottaa. Tuloksista selvisi, että korkein lämmitys- ja jäähdytysenergia on saavutettu pohjaveden ollessa 3 metriä maanpinnan alapuolella. Sitä huolimatta lämmöntasaaajajärjestelmä on tuottanut hyödytöntä jäähdytysenergiaa lopputalvella ja keväällä, kun maaperä ei kyennyt lämmittämään tuloilmaa toivottuun tasoon. Mutta pidemmän maaputkiston käytön seurauksena hyödytön jäähdytys eli maaperän tuloilman turha jäähdyttäminen on vähentynyt.

Pohjaveden vaikutuksen havainnollistamiseksi taulukossa 11 on esitetty lämmöntasaaja-järjestelmän energiatulosten erotukset, kun kummassakin syvyys on 2,5 m, putkikoko Ø 250x8,8 mm ja 3 metrin syvyydessä on havaittu pohjavettä, mutta toisessa ilman pohjavettä. Pohjaveden vaikutuksesta järjestelmän tuottama jäähdytys- ja lämmitysenergia ovat kasvaneet, lisäksi hyödytön jäähdytys- ja lämmitysenergia on vähentynyt.

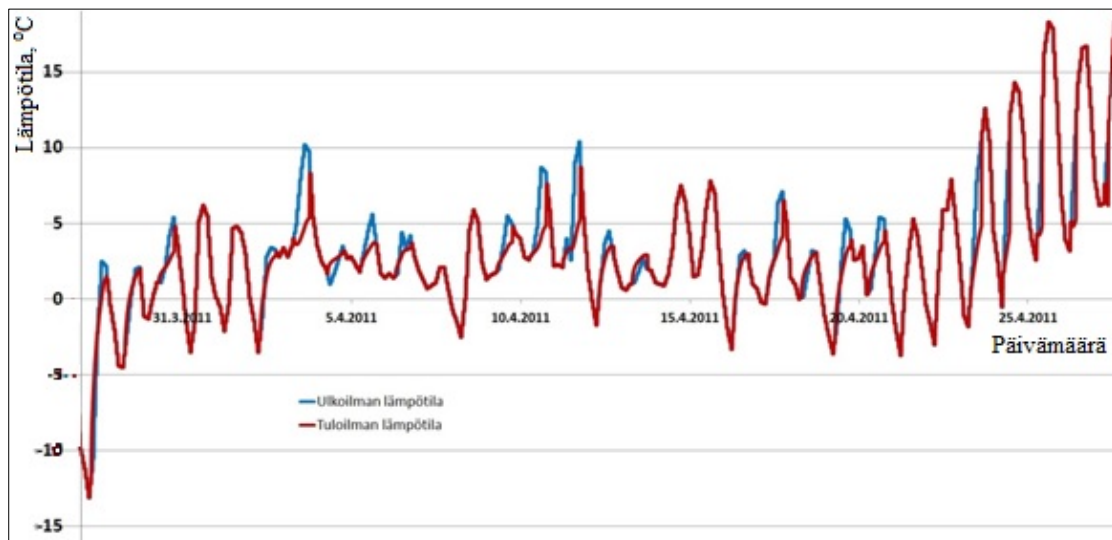
Taulukko 11. Energiatulosten väliset erotukset pohjaveden vaikutuksen kanssa ja ilman

L (Putkipituus)[m]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\Delta Q_{\text{jääh.}} [\text{MWh}]$	0	-0,42	-0,79	-1,05	-1,24	-1,39	-1,51	-1,6	-1,68	-1,74	-1,79
$\Delta Q_{\text{hyödytön jääh.}} [\text{MWh}]$	0	0,48	0,5	0,46	0,46	0,47	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49
$\Delta Q_{\text{läm.}} [\text{MWh}]$	0	0,82	1,61	2,14	2,46	2,66	2,79	2,88	2,95	3,01	3,05
$\Delta Q_{\text{hyödytön läm.}} [\text{MWh}]$	0	-0,04	-0,01	0	0	0	0	0	0	0	0



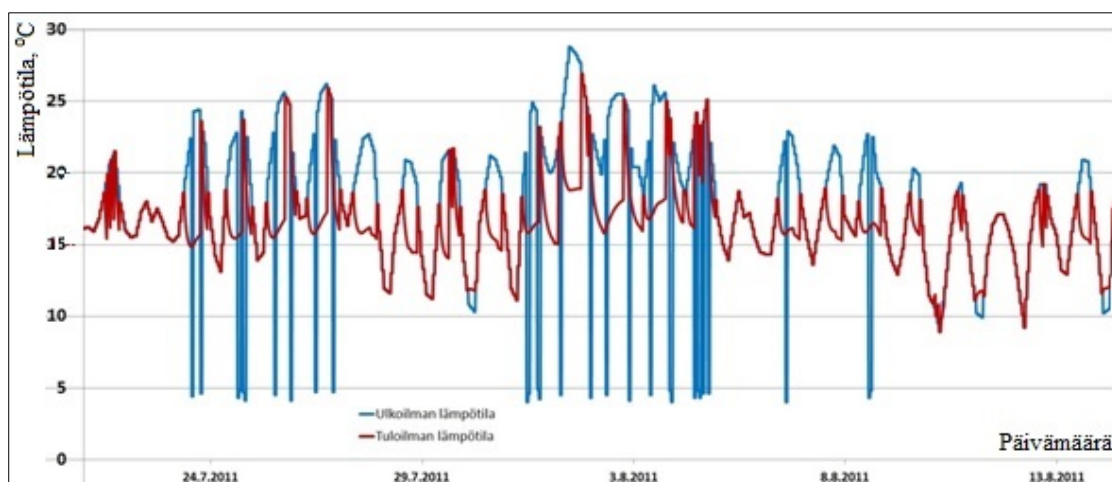
Kuva 56. Lämmityskaudella tuloilman lämmitys lämmöntasaajalla

Kuva 56 esittää lämmityskauden aikana lämmöntasaajajärjestelmällä esilämmitetyn tuloilman ja ulkoilman lämpötilat. Kuvan esittämässä tapaustutkimusryhmässä putkikoko oli Ø 250x8,8 mm, maaputkiston asennussyvyys 2,5 m, pohjaveden syvyys 3 m ja putkipituus 30 m. Kuva on vuoden kylmimmästä jaksosta, jolloin ilmanvaihto ja lämmöntasaajajärjestelmä ovat olleet käytössä. Sininen viiva esittää ulkoilman lämpötilaa ja punainen viiva lämmöntasaajajärjestelmällä esilämmitetyn tuloilman lämpötilaa. Punainen viiva seuraa sininen viiva, jolloin ilmanvaihtojärjestelmä ei ole ollut käytössä yöaikaan ja viikonloppuajankana. Kuvan esittämien tulosten mukaan lämmöntasaajajärjestelmä on pystynyt nostamaan tuloilman lämpötila -18,8 asteesta -3,7 asteeseen, jolloin ΔT on ollut yli 15 °C.



Kuva 57. Välikaudella tapahtunut hyödytön jäähtyminen

Kuva 57 esittää keväällä tapahtunutta hyödytöntä jäähtytystä, jolloin maaperän lämpötila on ollut niin alhainen, ettei se enää kyennyt lämmittämään tuloilmaa. Vaikka pohjaveden läsnäolo on parantanut asiaa jonkin verran, kuten esitettyinä taulukossa 11, silti saattaa esiintyä hyödytöntä jäähtytystä.

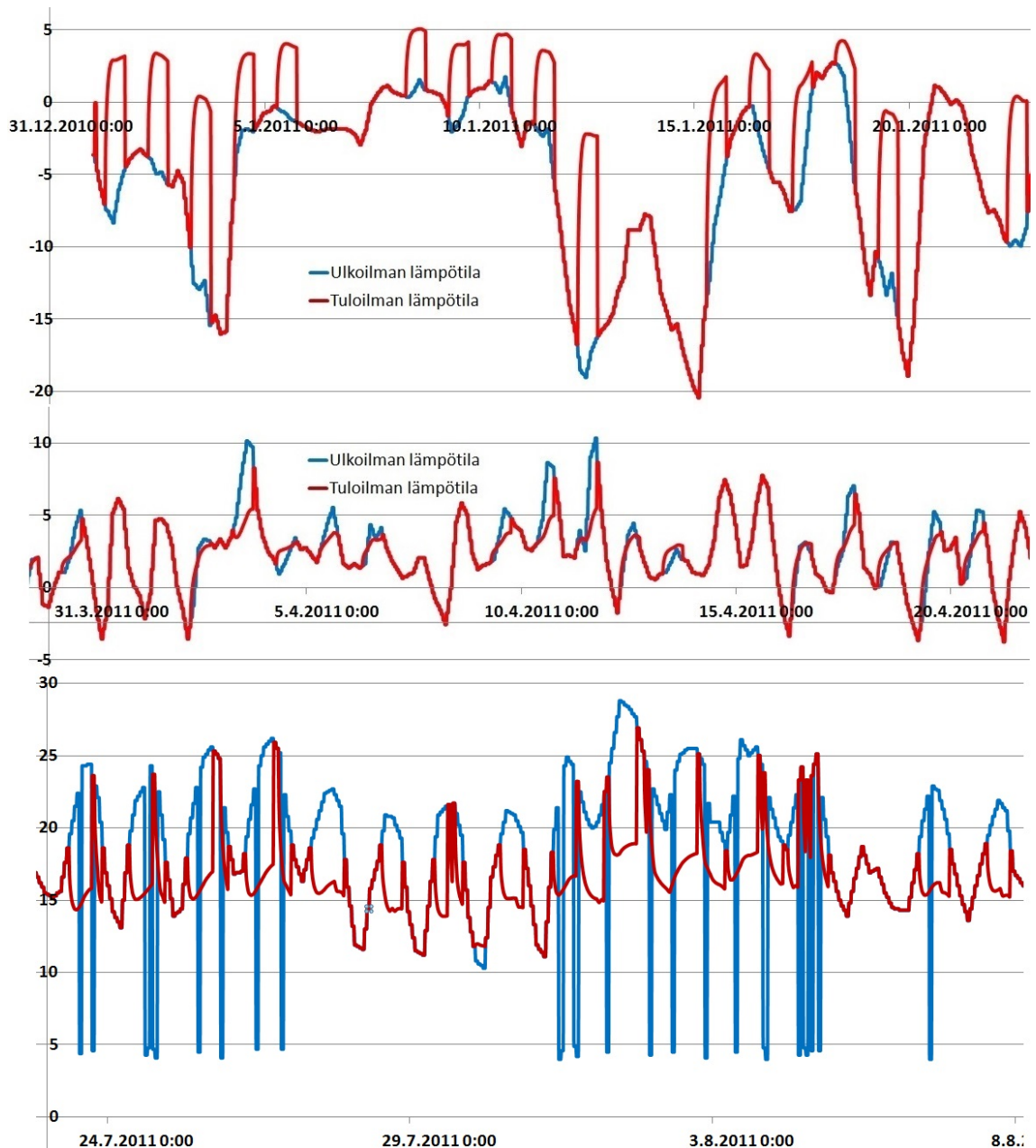


Kuva 58. Jäähdytyskaudella tuloilman jäähdytys lämmönsaajalla

Kuva 58 esittää jäähdytyskauden aikana lämmönsaajajärjestelmällä esijäähdytetyn tuloilman ja ulkoilman lämpötilat. Kuva on vuoden lämpimästä ajanjaksosta, jolloin ilmanvaihto ja luonnollisesti lämmönsaajajärjestelmä ovat olleet käytössä. Kuvan esittämien tulosten mukaan lämmönsaajajärjestelmä on pystynyt laskemaan tuloilman lämpötila 28,8 asteesta 18,8 asteeseen, jolloin ΔT on ollut 10 °C.

6.Johtopäätökset

Esimerkkikohteen RIUSKA ohjelmalla tehdyn energialaskennan mukaan, ilmanvaihdon lämmitysenergian tarve on vuodessa 15,8 MWh ja jäähdytysenergian tarve 12,7 MWh. Laskentatyökalulla tehdyn viimeisen tapaustutkimusryhmän mukaan ilmanvaihdon lämmityksestä säästetty energia on 18,11 MWh parhaimmissa tapauksessa kun maaputkisto on asennettu 2,5 metrin syvyyteen, havaittu pohjaveden syvyys 3m ja maaputkiston pituus 50 metriä. Tämä osoittaa, että oikeissa olosuhteissa lämmöntasaajajärjestelmä pystyy tuottamaan enemmän lämmitysenergiaa kuin ilmanvaihdon vuotuinen lämmitysenergian tarve, joka on hyvä asia rakennuksen energiatehokkuuden kannalta.



Kuva 59. Parhaassa tapaustutkimuksessa tapahtunut lämmitys, hyödytön jäähdytys ja jäähdytys

Tästä on vaikea tehdä johtopäätös, että voidaanko poistaa ilmanvaihtojärjestelmän lämmityspatteria. Kuvassa 59 esitettyjen tulosten mukaan talvella lämmöntasaajajärjestelmä pystyy leikkaamaan pahimman terän pois, mutta ei silti pysty nostamaan tuloilman lämpötila sellaiseen kohtaan, jonka jälkeen pärjätään ainoastaan lämmöntalteenotolla ilman erillistä lämmitystä. Myös kuvan 59 mukaan lopputalvella ja keväällä maaperä ei pysty lämmittämään tuloilmaa enää, jolloin vielä tarvitaan lämmitystoimintaa. Saman tapaustutkimuksen tulosten mukaan lämmöntasaajajärjestelmä parhaimmissa tapauksessa säästää vuodessa 8,08 MWh jäähdytysenergian tarpeesta. Lämmöntasaajajärjestelmä toimii erinomaisesti osana jäähdytysjärjestelmää. Laskelmien tulokset osoittavat, että lämmöntasaajajärjestelmä pystyy alentamaan ilman lämpötilaa yli kymmenellä asteella. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että ilmanvaihdon lämmityksessä ja jäähdytyksessä pärjätään pienemmällä tehontarpeella, mutta sitä ei voida poistaa kokonaan.

Lisäksi keväällä maaperän lämpötila on ulkoilman lämpötilaa jäljessä. Tästä syystä ilma pyrkii jäähtymään ja rakennukseen toimitettu ilma ei ole lämmintä. Tutkimustuloksista selvisi, että lämmöntasaajajärjestelmä aiheuttaa hyödytöntä jäähdytystä merkittävästi ja lisäksi jonkin verran tuloilman ylikämmenemistä loppukesällä. Tähän on ehdotettu useita ratkaisuja, kuten kausiluonteinen ohitusleikkaus, käsikäyttöinen kytkin tai automatisoitu kokonaisuohitus. Toisaalta nämä ratkaisut monimutkaistavat yksinkertaisuuden vuoksi suositellun lämmöntasaajajärjestelmän. Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että lämmöntasaajajärjestelmä on hyvin monimutkainen järjestelmä, sillä se vaatii kehittynyttä valvontaa ja tarvittaessa ohitusjärjestelmän tiettyinä aikoina.

Kuvan 59 esittämien tulosten mukaan lämmöntasaajajärjestelmä on pystynyt nostamaan tuloilman lämpötila -18,8 asteesta -2,5 asteeseen, jolloin ΔT on ollut yli 16 °C. Saman tapaustutkimuksen tulosten mukaan lämmöntasaajajärjestelmä on pystynyt alentamaan tuloilman lämpötila 28,8 asteesta 18,2 asteeseen, jolloin ΔT on ollut melkein 11 °C. Nämä luvut ovat osoittaneet diplomityön osassa 2.3 esitettyjen Keski-Euroopan maissa rakennettujen esimerkkikohteiden mittaustulosten kanssa läheisiä lukuja. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että lämmöntasaajajärjestelmä on oikein suunniteltuna ja hoidettuna toimiva ja tehokas uusiutuva energiamuoto, vaikka Suomen ankarissa olosuhteissa.

Lähteet

- [1]Öljyalan keskusliitto. Päästöt ja ilmastonmuutos. [Verkkosivu].
[Viitattu:3.5.2013]. Saatavissa: <http://www.oil.fi/>.
- [2]Euroopan komissio. Vähähiilistä taloutta koskeva etenemissuunnitelma.
[Verkkosivu]. [Viitattu:3.5.2013]. <http://ec.europa.eu/>.
- [3]Tilastokeskus. Tilastot, Asumisen energiankulutus 2011. [Verkkosivu].
[Viitattu:3.5.2013] Saatavissa: <http://www.tilastokeskus.fi/>.
- [4]Ympäristöministeriö, Sitra & Tekes. Energiaviisaan rakennetun aika 2017
(ERA17). Helsinki, 2010. 94 s. ISBN 978-952-11-3791-4 (sähköinen). ISBN
978- 952-11-3790-7 (painettu).
- [5]Aalto Yliopiston opintomonisteet. Ene-58.3113. [Verkkosivu].
[Viitattu 6.5.2013]. Saatavissa: <https://noppa.aalto.fi/noppa/app>
- [6]Oy REHAU Ab. Tuote-esittely. Case TESCO supermarket Zdieszowice/ Puola.
[www.dokumentti]. [Viitattu 21.7.2013]. Saatavissa:
http://www.rehau.com/linkableblob/SI_sl/500478/data/Objekt-Info_TESCO_Supermarkt_in_Zdzieszowice_Polen-data.pdf
- [7]Oy REHAU Ab. Tuotteet. Lämmöntasaaja suurkohteisiin. [Verkkosivu].
[Viitattu: 6.5.2013]. Saatavissa: http://www.rehau.com/FI_fi/
- [8]Ympäristöministeriö. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma - Rakennusten
energiatohokkuus, Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki, 2011. 35 s.
- [9]Ympäristöministeriö. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma - Rakennusten si-
säilmasto ja ilmanvaihto, Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki, 2011. 34 s.
- [10]Olli Seppänen. Ilmastoinnin suunnittelu. Suomen LVI-liitto ry. 2004.
ISBN9529168969
- [11]Olli Seppänen. Rakennusten lämmitys. Suomen LVI-liitto ry, 2001.
ISBN9519881107
- [12]Jari Sheimeikka. VTT. BAFF Kevätseminaari 2007, Espoo [Verkkosivu]
[Viitattu 22.5.2013]. Saatavissa:
http://www.automaatioseura.fi/index/tiedostot/Shemeikka_BAFF240507.pdf
- [13]Aalto Yliopiston opintomonisteet. Ene-58.4122. [Verkkosivu].
[Viitattu 31.5.2013]. Saatavissa: <https://noppa.aalto.fi/noppa/app>
- [14]Tuloilma lämpimäksi maan alta. Lehtijulkaisu. Juho Huttula.
Rakennusmaailma 5E/2010

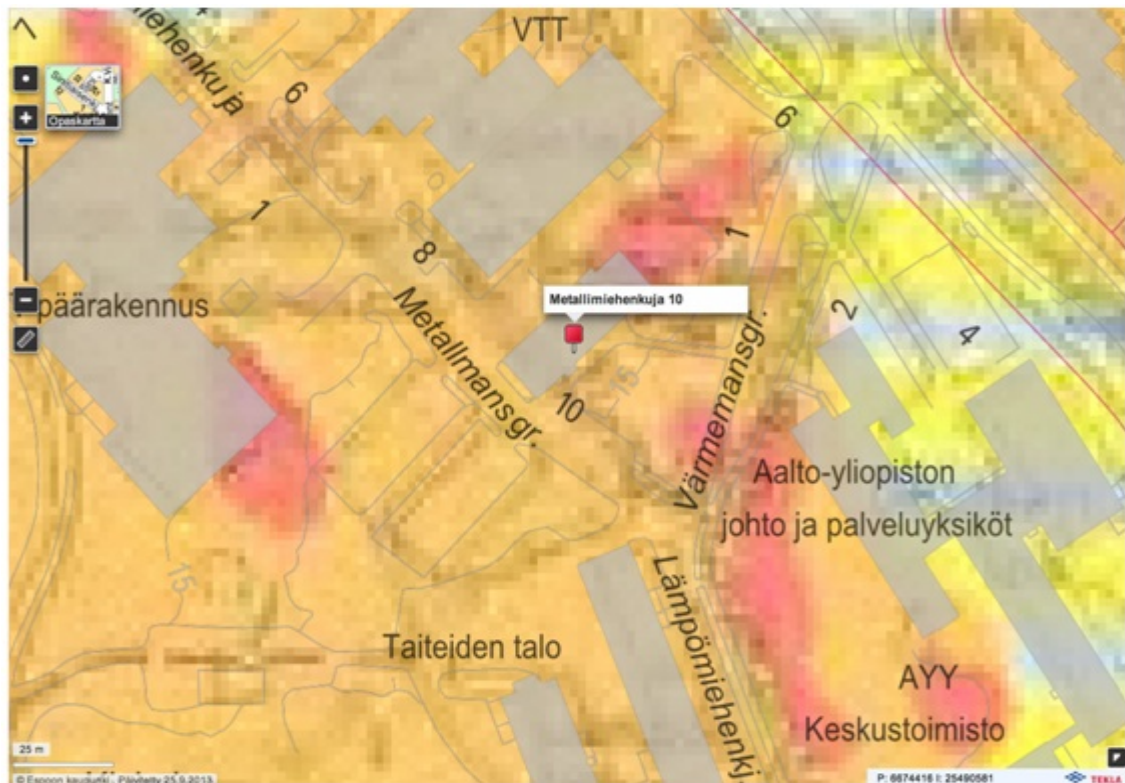
- [15]Lämmöntasaaja parantaa uudisrakennusten ilmanvaihdon energiatehokkuutta. Lehtijulkaisu. Voima&Käyttö. Suomen Konepääliitto 5-6/2010
- [16]Juhani Laine. REHAU AWADUKT Thermo maalämmönsiirrinjärjestelmän soveltuvuus ilmanvaihdon ulkoilmakanavistoksi – tarkastelu asiakirjojen perusteella. Tutkimusselostus. Espoo 2009. VTT-S-02124-09
- [17]Awadukt Thermo RT-kortti. [www-dokumentti]. [Viitattu 13.6.2013].
Saatavissa: <http://www.airhaus.fi/docs/AwaduktThermoRT-kortti.pdf>
- [18]Earth Tube Ventilation Systems-Applicability in the Canadian Climate. Canada Mortgage and Housing Corporation. [www-dokumentti]. [Viitattu 26.6.2013].
Saatavissa: <http://www.cmhc.ca/odpub/pdf/67558.pdf>
- [19]Earth-Air Heat Exchangers for Passive Air Conditioning: Case Study Burkina Faso. Journal of Construction in Developing Countries. Penerbit Universiti Sains Malaysia, 2012. [www-dokumentti]. [Viitattu 31.6.2013]. Saatavissa:
http://web.usm.my/jcdc/vol17_1_2012/Art%202_jcdc17-1.pdf
- [20]Thermoeconomic design of an earth to air heat exchanger used to preheat ventilation air in low energy buildings. Politehnica University of Bucharest. [www-dokumentti]. [Viitattu 1.7.2013]. Saatavissa: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Lanzarote/ENENENI/ENENENI-01.pdf>
- [21]Measurement, modeling and simulation of an earth-to-air heat exchanger in Marburg (Germany). Philipps Universität Marburg. [www-dokumentti]. [Viitattu 9.7.2013]. Saatavissa:
http://www.solarbau.de/monitor/doku/proj02/dokuproj/Wagner_Euro00.pdf
- [22]Energetic performance evaluation of an earth to air heat exchanger system for agricultural building heating. Solar Energy Institute, Ege University. [www-dokumentti]. [Viitattu 9.7.2013]. Saatavissa:
<http://www.ep.liu.se/ecp/057/vol5/ecp057vol5.pdf>
- [23]Nina Leppäharju. Pro gradu-tutkielma. Kallioenergian hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Oulun yliopisto. Huhtikuu 2008.
- [24]William Lowrie. Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press. 2007. ISBN 978-0-521-85902-8
- [25]Simple design tools for earth-air heat exchangers. Illinois Institute of Technology, USA. [www-dokumentti]. [Viitattu 28.7.2013]. Saatavissa:
http://www.ibpsa.us/simbuild2012/Papers/SB12_TS11b_2_Muehleisen.pdf

- [26]Tapaustutkimus. Awadukt Thermo tutkimusprojekti. Case TESCO supermarket Zdzieszowice/ Puola. [www-dokumentti]. [Viitattu 1.8.2013]. Saatavissa: http://www.ecobuild.co.uk/var/uploads/exhibitor/1176/tesco_case_study_2.pdf
- [27]Tapaustutkimus. Awadukt Thermo mittausten tulokset. Performance data for domestic & commercial installation. [www-dokumentti]. [Viitattu 1.8.2013]. Saatavissa: <http://cfile233.uf.daum.net/attach/182BDF464FA4208B11F9B6>
- [28]Tapaustutkimus. Rehau Sales Office, Metz, France. [www-dokumentti]. [Viitattu 1.8.2013]. Saatavissa: http://www.rehau.com/linkableblob/BE_fr/1033216/data/AWADUKT_Thermo_performances_thermiques_et_economiques-data.pdf
- [29]Riuska. Granlund Oy. [Verkkosivu]. [Viitattu 30.9.2013]. Saatavissa: <http://www.granlund.fi/ohjelmistot/riuska/>
- [30]Granlund Oy. Riuska ohje.
- [31]Rehau Awadukt Thermo Antimicrobial. Ground-air heat exchanger system for controlled ventilation. [www-dokumentti]. [Viitattu 3.10.2013]. Saatavissa: <http://www.thegreenbuildingsite.co.uk/download-tech-file.php?i=121>.
- [32]Nanna Ronkainen. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen ympäristökeskus 2.2012. ISBN 978-952-11-3975-8. [www-dokumentti]. [Viitattu 8.8.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=134704&lan=fi>
- [33]Frank P. Incropera, David P. Dewitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. ISBN13 978-0470-50197-9. 2011
- [34]K. Ya. Kondratyev. Radiation in the atmosphere (International Geophysics Series, Volume 12). Academic Press, 1969. ISBN 978-0124190504
- [35]Rehau Ecoair. Ground-air heatexchange system installation guide. [www-dokumentti]. [Viitattu 8.10.2013] Saatavissa: http://www.atlanticplywood.com/docs/REHAU_ECOAIR_Installation_Guide_7.09.pdf
- [36]Ground-air heat exchanger CPD. Renewable source of ventilation. . [www-dokumentti]. [Viitattu 10.10.2013] Saatavissa: http://www.rehau.com/FI_fi/
- [37]Aalto Yliopiston opintomonisteen. Ene-58.4129. [Verkkosivu]. [Viitattu 10.10.2013]. Saatavissa: <https://noppa.aalto.fi/noppa/app>
- [38]Yunus A. Cengel, John M. Cimbala, Robert H. Turner. Thermal-Fluid Sciences 4th Edition. ISBN 0073380202

- [39]Olli Seppänen. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Suomen LVI-liitto ry, 1996. ISBN9519609806
- [40]Ashrae Handbook, Fundamentals, Mass Transfer, 1989. ISBN0910110573
- [41]Pierre Hollmuller, Bernard Lachal. TRNSYS compatible moist air hypocaust model. Final Report. Geneven Yliopisto, Sveitsi, 1998. [www-dokumentti]. [Viitattu 14.10.2013] Saatavissa:
http://www.cuepe.ch/html/biblio/pdf/BuriedPipes_RapFin_1998.pdf
- [42]John E. Patterson, Ph.D. and Ronald J. Miers, Ph.D. The thermal conductivity of common tubing materials applied in a solar water heater collector. Western Carolina University, North Carolina. [www-dokumentti]. [Viitattu 14.10.2013] Saatavissa:
<http://ascpro0.ascweb.org/archives/cd/2010/paper/CPRT192002010.pdf>
- [43]Nanna Ronkainen. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen Ympäristökeskus (SYKE). ISBN978-952-11-3975-8. [www-dokumentti]. [Viitattu 14.10.2013] Saatavissa:
https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf?sequence=1
- [44]Helander R. Maapohjan lämpötekniset mitoituslaskelmat. Routa maa- ja pohjarakentamisessa. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. 1986. ISBN951-758-117-3
- [45]K-H. Korhonen, R. Gardemeister, M. Tammirinne. Geotekninen maaluokitus. Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 14. VTT, Otaniemi 1974.
- [46]R.D. Clear, L. Gartland, F.C. Winkelmann. An empirical correlation for the outside convective air film coefficient for horizontal roofs. Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory. California, USA 2001. [www-dokumentti]. [Viitattu 14.10.2013] Saatavissa:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802002402>
- [47]Walton G.N. Thermal analysis research program reference manual. National Bureau of Standards, Washington, USA. NBSIR83-2655
- [48]W. S. B. Paterson. The physics on glaciers. Third Edition. Great Britain, 1994. ISBN0750647426
- [49]Toive Aartolahti. Maantiede lukioita ja aikuisopiskelijoita varten. Helsinki, 1974. ISBN951-35-1099-9

- [50]RT 055.30. Ilmasto, säteily. Ohjekortti. Rakennusalan tietopalvelu. [www-dokumentti]. [Viitattu 17.10.2013]. Saatavissa: http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/4_ilmasto_sateily_055-30.pdf
- [51]Gavin Pretor-Pinney, Ulla Lempinen. Pilvibongarin opas. Jyväskylä, 2012. ISBN978-951-796-809-6
- [52]H.L. Penman. Vegetation and Hydrology. Commonwealth Agricultural Bureax, 1963. ISBN978-0851982298
- [53]Espoon kaupungin karttapalvelu. [www-palvelu]. [Viitattu 19.10.2013]. Saatavissa: <http://kartat.espoo.fi/ims>
- [54]Espoon karttapalvelun käyttöohjeet. [www-palvelu]. [Viitattu 19.10.2013]. Saatavissa: http://kartat.espoo.fi/Web/Linkit/Ohje/Guide_fin.htm
- [55]Maalajien kuvaus ja soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin. GTK. [www-sivu]. [Viitattu 19.10.2013]. Saatavissa: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/kuvausjasoveltuvuus.htm>
- [56]S.C. Colbeck. Snowmelt increase through albedo reduction. US Army Corps of Engineers. CRREL-tutkimus raportti 88-26. 1988. [www-sivu]. [Viitattu 19.10.2013]. Saatavissa: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA204523>
- [57]Pentti Pirinen, Henriikka Simola, Juha Aalto, Juho-Pekka Kaukoranta, Pirkko Karlsson, Reija Ruuhela. Tilastoja Suomen Ilmastosta 1981-2010. Raportteja 2012:1. [www-dokumentti]. [Viitattu 20.10.2013]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/35880>
- [58]Pohjaveden synty ja esiintyminen. GTK tietoaaineistot. [www-sivu]. [Viitattu 2.11.2013]. Saatavissa: http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/pohjav_esiintyminen.htm
- [59]Pohjavesialueiden kartoitus ja luokitus. Ympäristöopas 2009. Suomen Ympäristökeskus. Helsinki, 2009. ISBN 978-952-11-3375-6
- [60]OIVA – Ympäristö- ja paikkatietopalvelu asiantuntijoille. [www-sivu]. [Viitattu 7.11.2013]. Saatavissa: <http://www.wp2.ymparisto.fi/scripts/oiva.asp>

Liitteet



Maaperäkartan 1:10 000 selityksiä

© Espoon kaupunki/ Geotekninen yksikkö
Maalajit

	Kallioinen alue	Maakerroksen paksuus 0...1 m.
	Moreenialue	Moreenin paksuus yli 1 m, jonka alla kallio.
	Hiekka-alue	Hiekan paksuus yli 1 m.
	Savi/siltti-alue	Saven- ja silttikerroksen paksuus 0...3 m, jonka alla yleensä hiekkaa tai hiekkamoreenia.
	Savialue	Savikerroksen paksuus yli 3 m.
	Turvealue	Turvekerroksen paksuus yli 3 m, jonka alla yleensä savikerros.
	Täyttöalue	Täytekerroksen paksuus yli 1m.
	Savialue	Saven alapinnan arvioitut syvyyskäyrät maanpinnasta.

Kuva 60. Esimerkkikohteen maalaji

